

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

**FÁBIO RIZENTAL COUTINHO**

**UM NOVO MÉTODO ULTRASSÔNICO PARA DETECÇÃO DA  
POSIÇÃO DA INTERFACE EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS AR-  
ÁGUA**

**TESE**

**CURITIBA**

**2014**

FÁBIO RIZENTAL COUTINHO

**UM NOVO MÉTODO ULTRASSÔNICO PARA DETECÇÃO DA  
POSIÇÃO DA INTERFACE EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS AR-  
ÁGUA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Junior

Co-orientador: Prof. Dr. Rigoberto E. M. Morales

CURITIBA

2014

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

---

C871n Coutinho, Fábio Rizental  
2014 Um novo método ultrassônico para detecção da posição da interface em escoamentos bifásicos ar-água / Fábio Rizental Coutinho.-- 2014.  
136 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês  
Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2014  
Bibliografia: f. 121-127

1. Ultrassom. 2. Doppler, Ultrassonografia. 3. Escoamento multifásico. 4. Escoamento bifásico. 5. Gás - Escoamento. 6. Medição. 7. Análise espectral. 8. Engenharia elétrica - Teses. I. Neves Junior, Flávio, orient. II. Morales, Rigoberto Eleazar Melgarejo, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD 22 -- 621.3

Título da Tese Nº. \_\_\_\_\_

# Um Novo Método Ultrassônico para Detecção da Posição da Interface em escoamento Bifásicos Ar-Água.

por

**Fábio Rizental Coutinho**

**Orientador:** Prof. Dr. Flávio Neves Junior

**Coorientador:** Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 13h do dia 01 de agosto de 2014. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

---

Prof. Dr. Flávio Neves Junior  
(Presidente – UTFPR)

---

Prof. Dr. Jader Riso Barbosa Junior  
(UFSC)

---

Dr. Valdir Estevan  
(PETROBRAS)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lúcia Valéria Ramos de Arruda  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Daniel Rodrigues Pipa  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo  
Morales  
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

---

Prof. Emilio Carlos Gomes Wille, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)

*Dedico este trabalho aos meus pais, que nunca  
mediram esforços para que eu tivesse a melhor  
educação possível.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio Neves Júnior, e meu co-orientador Prof. Dr. Rigoberto E. M. Morales, pelo acompanhamento e discussões valiosas durante os meus trabalhos.

Ao professor Dr. Antonio Carlos Bannwart e ao aluno Jorge Luiz Biazussi pelo empréstimo do PXI que foi muito importante para o desenvolvimento dos trabalhos desta Tese.

Ao professor Dr. Marco da Silva pelo auxílio na compra da bibliografia, obtenção de artigos, e empréstimos do tacômetro que foram muito importantes para o desenvolvimento da tese.

Ao César Y. Ofuchi, pela ideia e incentivo iniciais para que ingressar na linha de pesquisa de técnicas ultrassônicas de Doppler pulsado e também por toda a ajuda e cooperação durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas do LACIT, principalmente ao Reinaldo e ao Eduardo Droszczaca pela ajuda na confecção de peças e estruturas mecânicas tão importantes para os experimentos nos experimentos realizados.

À minha esposa pela compreensão e paciência por dividir meu tempo livre entre ela e os meus afazeres da pesquisa do Doutorado.

À UTFPR, pelas instalações oferecidas para a realização desse trabalho.

A todos os colegas que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo apoio prestado em grande parte do Doutorado.

Ao Instituto de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) que por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor de Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-UTFPR) apoiaram financeiramente este projeto.

## RESUMO

COUTINHO, Fábio Rizental. Um novo método ultrassônico para detecção da posição da interface em escoamentos bifásicos ar-água. 2014. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Técnicas de medição de velocidade baseadas em ultrassom vem sendo muito utilizadas atualmente para o estudo de escoamentos de fluidos devido ao seu caráter não intrusivo. Em escoamentos bifásicos ar-água, a grande dificuldade na aplicação dessa metodologia é resolver a que fase pertence a velocidade medida. Esse problema envolve a tarefa de determinar a posição da interface líquido-gás. O algoritmo de estimação de velocidade denominado de *Velocity Matched Spectrum* (VMS) se diferencia dos demais por apresentar como resultado um espectro de velocidades para cada volume amostral interrogado. Neste trabalho um método baseado no formato dessa curva espectral da velocidade é utilizado para gerar um mapeamento espaço-temporal, o qual, após aplicação de filtros espaciais, resulta na detecção acurada da posição da interface água-ar. Para isso, um sistema de medição que utiliza o estimador VMS foi desenvolvido e validado através de um experimento de escoamento em cilindro girante e de um escoamento horizontal monofásico turbulento. A ascensão de bolhas em líquido estagnado apresenta dificuldades na detecção da fronteira água-ar devido às mudanças abruptas na inclinação da interface da bolha no seu movimento de subida. É mostrado que a técnica proposta apresenta um erro RMS entre 1,71 a 3,39 e uma probabilidade de falha na detecção e de falsa detecção entre 0,89% a 11,9% na determinação da posição espaço-temporal da interface água-ar de um escoamento externo de ascensão de bolhas em líquido estagnado. Mostra-se que a exatidão na determinação é mantida mesmo no caso de um transdutor obstruído por uma chapa metálica, ou então, emitindo externamente a uma tubulação de acrílico.

**Palavras-chave:** Ultrassom, Método Doppler, Escoamento Multifásico, Escoamento Bifásico Gás-líquido.

## ABSTRACT

COUTINHO, Fábio Rizental. A new method for ultrasound detection of interfacial position in gas-liquid two-phase flow. 2014. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Curitiba, 2014.

Ultrasonic measurement techniques for velocity estimation are currently widely used in flow study due to its non-intrusive nature. The difficulty on the application of this methodology to a two-phase air-water flow is in deciding from which phase the velocity data measured comes from. This problem involves the task of evaluating gas-liquid interface position. The algorithm known as Velocity Matched Spectrum (VMS) is a velocity estimator that stands out from other methods by returning a spectrum of velocities for each interrogated volume sample. In this work a method based on velocity spectrum curve shape is used to generate a spatial-temporal mapping, which, after spatial filtering, yields an accurate contour of the air-water interface. Therefore, a measurement system that implements VMS estimator was developed and validated through a rotating cylinder and a horizontal single-phase pipe turbulent flow experiments. Interface detection of free-rising bubbles in quiescent liquid presents some difficulties for interface detection due to abrupt changes in interface inclination. It is showed that the proposed technique yields a RMS error between 1.71 to 3.39 and a probability of detection failure or false detection between 0.89% to 11.9% in determining the spatial-temporal gas-liquid interface position in the flow of free rising bubbles in stagnant liquid. This result is valid for both free path and with transducer emitting through a metallic plate or a Plexiglas pipe.

**Keyword:** Ultrasound, Doppler Method, Multiphase flow, Gas liquid two-phase flow.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Padrão de escoamento em tubulação horizontal. ....	23
Figura 2 – Padrão de escoamento em tubulação vertical.....	24
Figura 3 – Mapa de fluxo para um escoamento bifásico horizontal ar-água.....	26
Figura 4 – Mapa de fluxo para um escoamento bifásico vertical ar-água.....	26
Figura 5 – Diagrama vetorial das velocidades para um escoamento bifásico. ....	27
Figura 6 – Deslocamento das partículas do meio devido a uma perturbação acústica.....	29
Figura 7 – Comportamento interfacial de uma onda plana quando encontra uma interface. ...	31
Figura 8 – Sequência de ilustrações de demonstram a formação de uma onda estacionária. ..	33
Figura 9 – Perfil de pressão axial com a distância para disparo contínuo e pulsado.....	35
Figura 10 – Lente convergente feita de um material com velocidade maior que a do meio. ....	36
Figura 11 – Esquema ilustrativo da malha de eletrodos ou <i>wire-mesh</i> . ....	39
Figura 12 – Ilustração genérica de um medidor de velocidade Pitot.....	40
Figura 13 – Ilustração da montagem típica de um anemômetro de fio/filme quente. ....	41
Figura 14 – Diagrama simplificado da implementação mais comum da técnica LDV. ....	42
Figura 15 – Arranjo experimental de um sistema PIV aplicado a um túnel de vento. ....	44
Figura 16 – Esquema das etapas de processamento de imagens aplicadas à técnica de PIV...	45
Figura 17 – Três abordagens típicas de aplicação da técnica ultrassônica. ....	47
Figura 18 - Diagrama do experimento realizado por Takeda, 1986. ....	50
Figura 19 – Perfil de velocidade para dois diferentes valores de número de Reynolds. ....	50
Figura 20 – PDF da velocidade para transdutores de diferentes diâmetros ativos. ....	51
Figura 21 – Filmagem e perfil de velocidades obtidas por um transdutor duplo anelar. ....	52
Figura 22 – Gráfico da equação (13) para tubulação de acrílico, alumínio e aço-carbono. ....	54
Figura 23 – Reflexão da onda de ultrassom numa interface líquido-bolha. ....	55
Figura 24 – Configuração do experimento de ascensão de bolhas em líquido quiescente.....	57
Figura 25 – Ecos de múltiplas emissões de ultrassom numa partícula em movimento.....	59
Figura 26 – Diagrama e gráficos que compõem a demodulação complexa. ....	65
Figura 27 – Exemplo de sinal de saída após a demodulação complexa. ....	67
Figura 28 – Representação dos dados de múltiplas emissões recebidas em duas dimensões ..	68
Figura 29 – Densidade espectral de potência idealizada e espectro projetado radialmente. ....	70
Figura 30 – Exemplo de segmentação dos dados. ....	74
Figura 31 – Exemplo de sobreposição espacial e temporal. ....	75
Figura 32 – Exemplo de um mapeamento espaço-temporal da velocidade. ....	78
Figura 33 – Diagrama em blocos do sistema de medição. ....	80
Figura 34 – Diagrama do movimento das partículas no sistema de um cilindro girante. ....	83
Figura 35 – Vista 3D do conjunto cilindro, motor e cuba. ....	86
Figura 36 – Foto da montagem do experimento de cilindro girante. ....	87
Figura 37 – Perfil da velocidade espacial medido para rotação de 50, 60 e 70 RPM. ....	90
Figura 38 – Diagrama da planta experimental para escoamento horizontal monofásico.....	93
Figura 39 – Foto da montagem dos transdutores nas estações de medição.....	93
Figura 40 – Desenho mecânico do transdutor duplo elemento da montagem realizada. ....	94
Figura 41 – Comparação do perfil da velocidade medido para teórico ( $J_L=0,7$ m/s).....	96
Figura 42 – Velocidade esperada normalizada pela máxima velocidade versus velocidade medida normalizada pela máxima velocidade para o transdutor de duplo elemento. ....	97

Figura 43 – Velocidade esperada normalizada pela máxima velocidade versus velocidade medida normalizada pela máxima velocidade para o transdutor de elemento único. ....	98
Figura 44 – Montagem experimental da cuba com partículas. ....	103
Figura 45 – Amostra de imagem utilizada para estimar o tamanho das bolhas. ....	104
Figura 46 – Mapeamentos do quadrado do valor de pico do espectro e velocidade. ....	105
Figura 47 – Exemplo de espectros de velocidades obtidos na ascensão de bolhas. ....	106
Figura 48 – Comparação entre mapa gerado com $M_1$ e mapa de intensidade do eco. ....	108
Figura 49 – Resultados de desempenho para os filtros selecionados. ....	110
Figura 50 – Diagrama do experimento de ascensão de bolhas em tubo de acrílico. ....	111
Figura 51 – Resultados de desempenho dos parâmetros de formato em tubo de acrílico. ....	113
Figura 52 – Configuração experimental para ascensão de bolhas com placa metálica. ....	115
Figura 53 – Comparação de mapas espaço-temporal para 0,5 segundos de aquisição. ....	117
Figura 54 – Diagrama de interação da onda de ultrassom com uma partícula refletora. ....	128
Figura 55 – Diagrama da realização típica da técnica Doppler em escoamentos. ....	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade e parâmetros acústicos para alguns materiais ou substâncias.....	30
Tabela 2 – Resultados dos momentos de ordem $n$ para perfil teórico.....	85
Tabela 3– Erros entre momento teórico e medido para escoamento em cilindro.....	88
Tabela 4 – Erro relativo dos momentos para o escoamento horizontal (duplo elemento) .....	95
Tabela 5 – Erro relativo dos momentos para o escoamento horizontal (elemento único).....	96
Tabela 6 – Comparação do erro médio quadrático(MSE).....	98
Tabela 7 – Valor do SDR para os parâmetros de formato.....	105
Tabela 8 – Lista dos filtros espaciais estudados.....	109
Tabela 9 – Valor do SDR para experimento com tubo.....	112
Tabela 10 – Valor do SDR para experimento sem partículas .....	114
Tabela 11 – Resultados da acurácia da detecção sem partículas .....	114
Tabela 12 – Valor do SDR para experimento com placa metálica.....	115
Tabela 13 – Resultados da acurácia da detecção com placa metálica .....	116

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>CFD</b>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<b>VMS</b>	<i>Velocity Matched Spectrum</i>
<b>LDV</b>	<i>Laser Doppler Velocimetry</i>
<b>PIV</b>	<i>Particle Image Velocimetry</i>
<b>CCD</b>	<i>Charge-Coupled Device</i>
<b>PTV</b>	<i>Particle Tracking Velocimetry</i>
<b>PEPT</b>	<i>Positron Emission Particle Tracking</i>
<b>UVP</b>	<i>Ultrasound Velocity Profiler</i>
<b>PDF</b>	Função de Distribuição de Probabilidade
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<b>PRF</b>	<i>Pulse Repetition Frequency</i>
<b>PXI</b>	<i>PCI eXtensions for Instrumentation</i>
<b>PCI</b>	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
<b>USB</b>	<i>Universal Serial Bus</i>
<b>RPM</b>	Rotações por Minuto
<b>SNR</b>	<i>Signal-to-Noise-Ratio</i>
<b>VS</b>	<i>Velocity Spectrum</i>
<b>SDR</b>	<i>Shape Decision Rule</i>
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Square</i>
<b>PDF</b>	Probabilidade de falha na detecção
<b>PFP</b>	Probabilidade de falso positivo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Indica a “força” da reflexão da partícula em movimento	-
$a_{k,i}$	Coefficientes do filtro passa-altas	-
$b(d)$	Função de sensibilidade transversal do feixe	J
$b_2()$	Resultado da autocorrelação de $b$	-
$c$	Velocidade do som	m/s
$c_L$	Velocidade com que o som se propaga na lente	m/s
$c_m$	Velocidade com que o som se propaga no meio de foco	m/s
$d$	Distância a partir do eixo central do feixe do transdutor	m
$d_0$	Profundidade correspondente a $t_0$	m
$d_r$	Posição relativa do transdutor de ultrassom ao eixo do cilindro	m
$d_t$	Espessura da parede da tubulação	m
$d_L$	Resolução lateral do transdutor	m
$dA_G$	Vetor diferencial da área da fase gasosa	$m^2$
$dA_G$	Diferencial da área da fase gasosa	$m^2$
$dA_L$	Diferencial da área da fase líquida	$m^2$
$dA_L$	Vetor diferencial da área da fase líquida	$m^2$
$f(v)$	Valor da amplitude do espectro VMS	J/Hz
$f_c$	Frequência da onda incidente emitida pelo transdutor	Hz
$f_s$	Frequência de amostragem	Hz
$f_{LDV}$	Frequência recebida no fotodetector da técnica LDV	Hz
$k$	Número da emissão considerada	-
$k_a$	Compressão adiabática	$m^2/N$
$l_f$	Distância focal da lente	m
$m_t$	Média das amostras na profundidade	-
$n$	Vetor normal a superfície da área da seção do tubo	-
$n_i$	Número inteiro qualquer diferente de zero	-
$n_c$	Número de ciclos gerados numa emissão	-
$p$	Pressão	$kg/(ms^2)$
$p_i$	Pressão acústica da onda incidente	$kg/(ms^2)$

$p_r$	Pressão acústica da onda refletida	kg/(ms <sup>2</sup> )
$p_t$	Pressão acústica da onda transmitida	kg/(ms <sup>2</sup> )
$q_z$	Quociente das impedâncias acústicas do meio e da tubulação	-
$q_G$	Vazão volumétrica da fase gasosa	m <sup>3</sup> /s
$q_L$	Vazão volumétrica da fase líquida	m <sup>3</sup> /s
$r$	Distância da partícula até o eixo do cilindro	m
$r_i(t)$	Sinal recebido na emissão $i$	J
$r_{ti}(t)$	Componente estacionária do sinal recebido da $i$ -ésima emissão	-
$r_{si}(t)$	Componente do movimento dos refletores da $i$ -ésima emissão	-
$s$	Comprimento de um arco	m
$s(t)$	Função de espalhamento de ponto	-
$s_2()$	Resultado da autocorrelação de $s$	-
$s_t$	Coefficiente angular da regressão linear	-
$t_0$	Atraso de tempo relativo a cada emissão	s
$t_s$	Atraso ou avanço no tempo devido ao movimento relativo das partículas	s
$v$	Velocidade linear	m/s
$v_p$	Velocidade medida pelo tubo de Pitot	m/s
$v_r$	Componente radial da velocidade das partículas	m/s
$v_t$	Velocidade que o refletor se move transversalmente ao feixe de ultrassom	m/s
$v_{LDV}$	Velocidade da partícula na técnica LDV	m/s
$\mathbf{v}_G$	Vetor que caracteriza a velocidade de $dA_G$	m/s
$\mathbf{v}_L$	Vetor que caracteriza a velocidade de $dA_L$	m/s
$\bar{v}(r)$	Média temporal da componente da velocidade local em $r$	m/s
$\bar{v}_G$	Módulo da velocidade média espacial da fase gasosa	m/s
$\bar{\mathbf{v}}_G$	Vetor da velocidade média espacial da fase gasosa	m/s
$\bar{v}_L$	Módulo da velocidade média espacial da fase líquida	m/s
$\bar{\mathbf{v}}_L$	Vetor da velocidade média espacial da fase líquida	m/s
$x_e(t)$	Envoltória complexa	J
$x_p(t)$	Pré-envoltória complexa	J
$x_{RF}(t)$	Sinal de alta frequência do transdutor de ultrassom	J
$w[]$	Janela de Hamming bidimensional	-

$z_i(t)$	Equação da regressão linear	-
$z_R$	Delimita a fronteira entre o campo próximo e o distante	m
$A_G$	Área da superfície da seção do tubo que abrange a fase gasosa	m <sup>2</sup>
$A_L$	Área da superfície da seção do tubo que abrange a fase líquida	m <sup>2</sup>
$A_T$	Área total da superfície da seção do tubo	m <sup>2</sup>
$AR$	Resolução axial	m
$B(\omega_2)$	Transformadas de Fourier de $b$	-
$D_f$	Profundidade do foco	m
$D_A$	Diâmetro ativo de um transdutor	m
$E[]$	Esperança matemática	-
$E_{RMS}$	Erro médio quadrático espaço-temporal de detecção	-
$G_x()$	Densidade espectral de energia sem considerar as réplicas ( <i>nonaliased</i> )	J/Hz
$\hat{G}_x()$	Densidade espectral de energia estimada de um processo estocástico	J/Hz
$I$	Imagem construída com o parâmetro de formato	-
$J_G$	Velocidade superficial da fase gasosa	m/s
$J_L$	Velocidade superficial da fase líquida	m/s
$M$	Número de emissões consideradas	-
$M_n$	Momentos de ordem $n$ de uma função	-
$N$	Número de pontos de tempo de trânsito considerados	-
$N_c$	Número ímpar de linhas	-
$P$	Profundidade	m
$K$	Número de ciclos gerados numa emissão	-
$R$	Raio interno da tubulação	-
$Re$	Número de Reynolds	-
$R_f$	Resistência do fio/filme na temperatura de referência $T_f$ .	$\Omega$
$R_m$	Resistência do fio/filme na temperatura média do sensor, $T_m$	$\Omega$
$R_r$	Coefficiente de reflexão	m
$R_x()$	Função de autocorrelação	-
$R_L$	Raio de curvatura da lente	m
$S(\omega_1)$	Transformadas de Fourier de $s$	-
$SNR$	Relação sinal-ruído	-

$T$	Coeficiente de transmissão	-
$T_f$	Temperatura de referência do anemômetro de fio-quente	K
$T_m$	Índice de transmissão da onda ultrassônica no metal	-
$T_{prf}$	Período de tempo fixo entre emissões consecutivas	s
$T_s$	Período de amostragem	s
$T_M$	Temperatura média do anemômetro de fio-quente	K
$U_{max}$	Velocidade máxima do perfil espacial de velocidade obtida em $r = 0$	m/s
$V$	Valor médio espacial ou o momento de ordem zero de $v_r(x)$	m/s
$Z$	Impedância acústica do meio	kg/(m <sup>2</sup> s)
$\alpha$	Fator de escalonamento do tempo	-
$\gamma$	Fração da área total da seção do tubo ocupada pelo gás	%
$\delta$	Profundidade da camada de velocidade nula	m
$\delta t$	Erro no tempo	s
$\delta x$	Erro no espaço	m
$\delta_I^2(i, j)$	Variância local da imagem $I$ na posição $(i, j)$	-
$\theta_c$	Ângulo descrito pela partícula no escoamento em cilindro girante	rad
$\theta_i$	Ângulo do feixe acústico incidente	rad
$\theta_f$	Metade do ângulo formado entre feixes na técnica LDV	rad
$\theta_r$	Ângulo do feixe acústico refletido	rad
$\theta_t$	Ângulo do feixe acústico transmitido	rad
$\lambda$	Comprimento de onda no meio considerado	m
$\lambda_o$	Comprimento de onda de uma fonte laser	m
$\lambda_f$	Distância entre franjas	m
$\mu$	Coeficiente de temperatura do material do anemômetro	$\Omega/K$
$\mu_I$	Média local	-
$\rho$	Densidade média do meio	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_L$	Densidade do líquido no tubo de Pitot	kg/m <sup>3</sup>
$\omega$	Velocidade angular	m/s
$\emptyset$	Ângulo de inclinação do feixe relativo a interface gasosa	rad
$\emptyset_d$	Ângulo de divergência do feixe acústico de um transdutor	rad
$\emptyset_s$	Defasagem do sinal devido ao movimento relativo das partículas	rad



$\Delta x$	Resolução espacial	m
$\Delta t$	Resolução temporal	s

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1 OBJETIVOS .....	20
1.2 CONTEÚDO DA TESE .....	21
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>22</b>
2.1 ESCOAMENTOS BIFÁSICOS .....	22
2.1.1 Equações do escoamento bifásico .....	27
2.2 FUNDAMENTOS DE ULTRASSOM .....	29
2.2.1 Espalhamento.....	33
2.2.2 Características dos transdutores.....	34
2.3 REVISÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS.....	37
2.4 REVISÃO DAS TÉCNICAS DOPPLER ULTRASSÔNICAS PARA ESCOAMENTOS .....	49
<b>3 SISTEMA PARA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE POR VMS .....</b>	<b>58</b>
3.1 MODELO DE INTERAÇÃO DO ULTRASSOM COM AS PARTÍCULAS .....	58
3.2 DEMODULAÇÃO COMPLEXA .....	64
3.3 ESTIMAÇÃO DO ESPECTRO DA VELOCIDADE.....	67
3.4 PRÉ-PROCESSAMENTO .....	73
3.4.1 Segmentação dos dados de entrada.....	73
3.4.2 Filtro de cancelamento de ecos estacionários .....	75
3.5 PÓS-PROCESSAMENTO .....	78
3.6 COMPOSIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO .....	79
<b>4 EXPERIMENTOS E CONTRIBUIÇÃO .....</b>	<b>82</b>
4.1 ESCOAMENTO EM CILINDRO GIRANTE .....	82
4.1.1 Modelo teórico.....	82
4.1.2 Descrição do experimento .....	85
4.2 ESCOAMENTO INTERNO HORIZONTAL MONOFÁSICO .....	91
4.2.1 Modelo teórico.....	91
4.2.2 Montagem experimental .....	92
4.2.3 Análise da acurácia .....	95
4.2.4 Resultados.....	95
4.3 ASCENSÃO LIVRE DE BOLHAS EM LÍQUIDO ESTAGNADO .....	99
4.3.1 Detecção da interface líquido-gás.....	99
4.3.2 Parâmetros de formato do espectro.....	100
4.3.3 Montagem Experimental .....	102
4.3.4 Influência da tubulação de acrílico .....	111
4.3.5 Sem a utilização de partículas.....	113
4.3.6 Influência de parede metálica .....	114

<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>118</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	119
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>121</b>
<b>APENDICE A – TEORIA CLÁSSICA DO DOPPLER PULSADO .....</b>	<b>128</b>
<b>APENDICE B – LISTA DE PUBLICAÇÕES.....</b>	<b>134</b>
B.1 PUBLICAÇÕES CONTIDAS NESTA TESE.....	134
B.2 PUBLICAÇÕES NÃO RELACIONADAS DIRETAMENTE .....	134
<b>APENDICE C – ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO DE VELOCIDADE .....</b>	<b>135</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O movimento de deformação sucessivo da matéria que não resiste a esforços cisalhantes constitui um escoamento. Quando múltiplas substâncias imiscíveis e distintas estão envolvidas, assinala-se o escoamento como multifásico. Sua importância é tão grande, que se for feito um exame dos escoamentos que ocorrem em vários tipos de equipamentos, da produção de petróleo passando pela geração de energia e indústria química, irá revelar que, a maioria, senão todos envolvem a passagem de duas ou mais fases. Portanto o escoamento multifásico é ubíquo (AZZOPARDI, 2006).

Nesse escopo, um escoamento em particular que envolve o fluxo de líquido com bolhas dispersas merece lugar de destaque, por ser parte constituinte em vários outros padrões de escoamento gás-líquido e pela caracterização ainda incompleta dos fenômenos que o regem, como a turbulência e o movimento das bolhas, por exemplo. Aparecendo predominantemente nas situações de baixa vazão de gás, ele é encontrado em diversas etapas da extração de petróleo. Entender a sua dinâmica é fundamental para prever situações de golfadas em plataformas de petróleo, ou então a queda de desempenho em bombas centrífugas, por exemplo.

Esse conhecimento pode ser obtido através da resolução das equações de conservação, de forma literal ou numérica (através da utilização de simuladores CFD) ou então conduzindo experimentos, obtendo-se correlações entre variáveis para cada fenômeno observado. Entretanto, caracterizar completamente o escoamento com um ou outro paradigma é uma tarefa extremamente complexa. Atualmente, a busca por uma descrição completa do fenômeno levou a união das duas abordagens.

Neste esforço conjunto de estudo, a tarefa de desenvolver e aprimorar novas técnicas de medição é primordial para o avanço das abordagens baseadas em correlações empíricas. Assim, instrumentos que utilizam princípios ópticos, por exemplo, tornam-se uma opção quando as fases estudadas são opticamente transparentes. Técnicas de impedância apresentam baixo custo e boas resoluções espacial e temporal, contudo sua sonda precisa estar em contato com o escoamento por isso são ditas intrusivas ou pelo menos invasivas. A utilização de técnicas baseadas em radiação nuclear, como os Raios-x, dentre outras, supera a maior parte dos problemas anteriores, entretanto são consideradas perigosas e de instalação e manuseio

complexos. A ressonância magnética seria a solução para substituir as nucleares, todavia sua utilização esbarra num custo muito elevado, desde aquisição, instalação e manutenção dos equipamentos.

É por isso que a instrumentação baseada em ultrassom tem atraído tanta atenção, devido a seu caráter não intrusivo (MURAKAWA; KIKURA; ARITOMI, 2008), não invasivo (MURAI et al., 2010), robustez, custo moderado (DaSILVA, 2008), facilidade de instalação e manutenção (MURAI et al., 2009), que a torna viável de uma posterior implementação industrial (MORI et al., 2002).

A técnica ultrassônica baseada no efeito Doppler, já bastante empregada na área biomédica, ganhou destaque na área de escoamentos multifásicos, principalmente porque fornece a informação de velocidade do escoamento sem a necessidade de recorrer à calibração ou de restringir as propriedades físicas dos fluidos, desvantagens presentes na grande maioria das outras técnicas quando se prestam a medir velocidade. Como a técnica Doppler é utilizada desde a década de 60, existem muitos métodos de cálculo da velocidade relacionados na literatura. O algoritmo que estima a velocidade por deslocamento da fase é muito adotado atualmente por apresentar um baixo custo computacional — fator crítico para ser executado em tempo real nos computadores disponíveis no final do século XX. No momento atual, é possível retomar o interesse por estimadores anteriormente propostos que não encontraram espaço naquela época devido à demanda de cálculos incompatível com o poder de processamento dos sistemas daquele período. A técnica *Velocity Matched Spectrum*, ou VMS, diferencia-se das técnicas convencionais, por entregar na saída, não só um valor de velocidade estimado, mas também uma distribuição de velocidades possíveis para um determinado volume de medição.

Esta tese está centrada no problema de identificar a qual fase pertence a velocidade medida pela técnica Doppler pulsada. Para atingir tal objetivo, propõe-se um novo método de detecção da posição espaço-temporal da interface líquido-gás que utiliza apenas um transdutor de ultrassom. No intuito de produzir melhores resultados que o estado atual da arte é sugerido a utilização do algoritmo de estimação de velocidade VMS, que aborda o problema de obtenção da velocidade de forma bem diferente da tradicional. Nele o processamento dos sinais de ultrassom é tratado como um problema em duas dimensões, o que aumenta o custo computacional. Todavia, em sua saída ele entrega, não somente o valor da velocidade estimada, mas também um espectro de velocidades. É mostrado que a energia desse espectro

está relacionada com a fronteira das fases, e, portanto, pode ser utilizada para resolver a posição da interface. Dessa forma é proposta uma forma de extrair parâmetros do formato da curva do espectro da velocidade retornada pelo algoritmo VMS para resolver a posição da interface líquido-gás em escoamentos bifásicos. Mais do que uma alternativa, a metodologia descrita nesta Tese se mostra mais confiável do que empregar a técnica de intensidade dos ecos, principalmente para casos onde o acoplamento do transdutor com paredes metálicas resultam em baixas relações sinal-ruído. Essa metodologia é posta a prova num caso complexo de detecção de interface, que é o da ascensão de bolhas livres em líquido estagnado, onde é demonstrado que a mesma obtém resultados que ultrapassam o desempenho das técnicas atuais.

## 1.1 OBJETIVOS

Desenvolver um método para obtenção de parâmetros associados ao espectro de velocidades fornecido pelo algoritmo VMS para a detecção da posição espaço-temporal da interface de escoamentos bifásicos líquido-gás. Para cumprir este objetivo, as seguintes metas foram realizadas:

- Desenvolvimento de um sistema de medição do campo espacial de velocidades aplicado a escoamentos monofásicos através de instrumentação ultrassônica pulsada e baseado no algoritmo de estimação denominado *VMS*;
- Validação do sistema de medição e de transdutores de ultrassom através da medição do perfil de velocidade espacial de um escoamento em cilindro girante e num escoamento horizontal monofásico turbulento.
- Avaliação do desempenho da metodologia proposta num escoamento bifásico de superfície livre de ascensão de bolhas em líquido estagnado.

## 1.2 CONTEÚDO DA TESE

No capítulo 2 é realizada uma breve revisão dos conceitos básicos de escoamentos multifásicos e sobre os fundamentos da física do ultrassom, seguidos pelo estado da arte das técnicas de instrumentação de escoamento bifásicos, dando especial atenção às técnicas voltadas para determinação da posição da interface líquido-gás e de estimação da velocidade. Ao final desse capítulo é apresentada uma revisão dos artigos que utilizam a técnica Doppler ultrassônica pulsada para resolver a posição espaço-temporal da interface líquido-gás.

O terceiro capítulo descreve toda a teoria de processamento de sinais utilizada para o desenvolvimento do sistema de medição compreendendo o modelo de interação das ondas de ultrassom, a demodulação complexa do sinal, a estimação da velocidade pelo algoritmo VMS, as etapas de pré-processamento e pós-processamento do sinal, a extração de parâmetros da curva espectral e por fim a descrição do sistema de medição.

O penúltimo capítulo apresenta os resultados dos experimentos de validação do sistema de medição desenvolvido para um escoamento em cilindro girante e um escoamento interno horizontal monofásico. Uma nova metodologia para resolver a posição da interface líquido-gás é proposta através da construção de um mapeamento espaço-temporal com os valores obtidos da análise do formato da curva espectral da velocidade retornado pelo algoritmo VMS. Essa técnica é testada para determinação da posição espaço-temporal da interface água-ar em um escoamento de ascensão de bolhas em líquido parado.

Uma análise sobre todo o trabalho, observações, ideias e experimentos futuros são discutidos no último capítulo.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

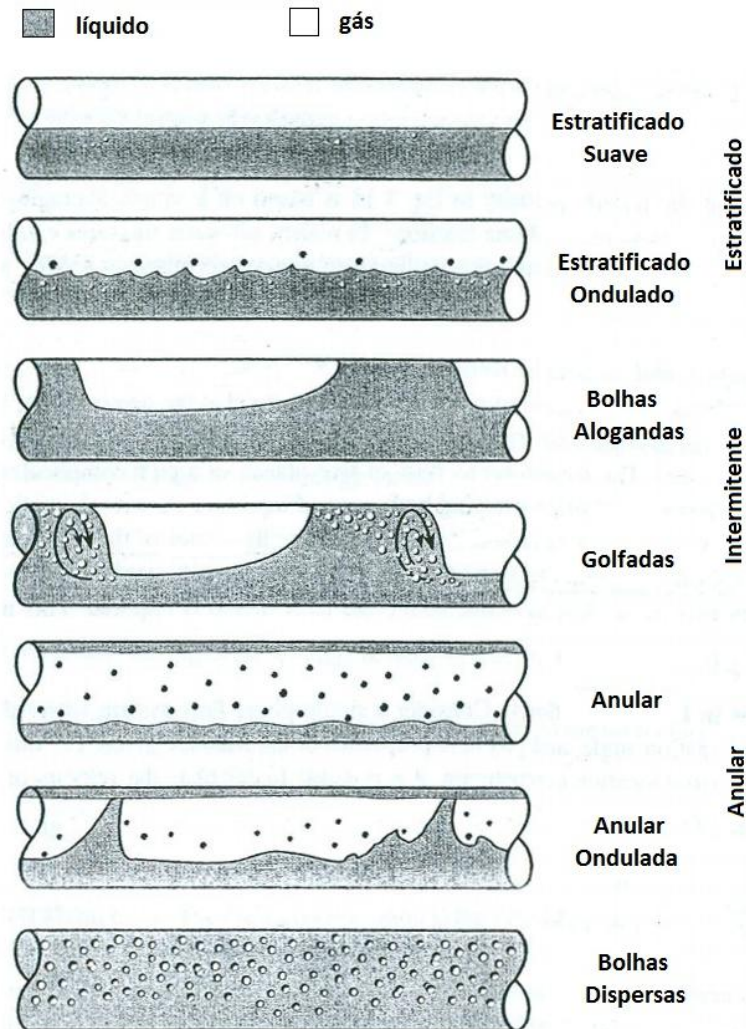
Este capítulo inicia com os conceitos básicos necessários para a compreensão dos mecanismos físicos que governam os escoamentos multifásicos e sobre as ondas de ultrassom. Na segunda parte é feita uma análise sobre as técnicas de medição atuais que são mais empregadas na instrumentação e caracterização destes tipos de escoamentos. Por fim é feita uma revisão do estado da arte da técnica Doppler pulsada ultrassônica aplicada à detecção de posição da interface líquido-gás.

### 2.1 ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

Em um escoamento multifásico as substâncias que o compõe, denominadas de fases, podem estar em qualquer estado da matéria (sólido, líquido e gasoso) e cada combinação gera um tipo de escoamento com propriedades distintas. Devido a essa dificuldade inerente, encontrou-se no escoamento bifásico um objeto de estudo simplificado e que tem grande representatividade de aplicações (SHOHAM, 2006). Apesar dessa limitação em duas fases, ainda assim, a tarefa de caracterizá-lo é um problema aberto e objeto de muita pesquisa.

Mesmo restrito a duas fases, existe uma combinação de fases no escoamento bifásicos que envolve a passagem simultânea de gás e líquido, que atrai muita atenção pela sua grande ocorrência na indústria e complexidade de caracterização. Neste tipo de escoamento, as vazões volumétricas das fases, a geometria que as contém e suas propriedades físicas influenciam em como as fases se distribuem espacialmente na tubulação. Essa distribuição espacial pode ser agrupada em padrões que alguns autores se esforçam em classificar. Como a classificação é feita através de inspeção visual, existem desacordos entre aqueles que tentam ser mais detalhistas e os que procuram distribuir em pequenos grupos. A classificação mostrada nas Figuras 1 e 2 é a adotada por Shoham (2006), onde os padrões foram agrupados de acordo com o posicionamento da tubulação.



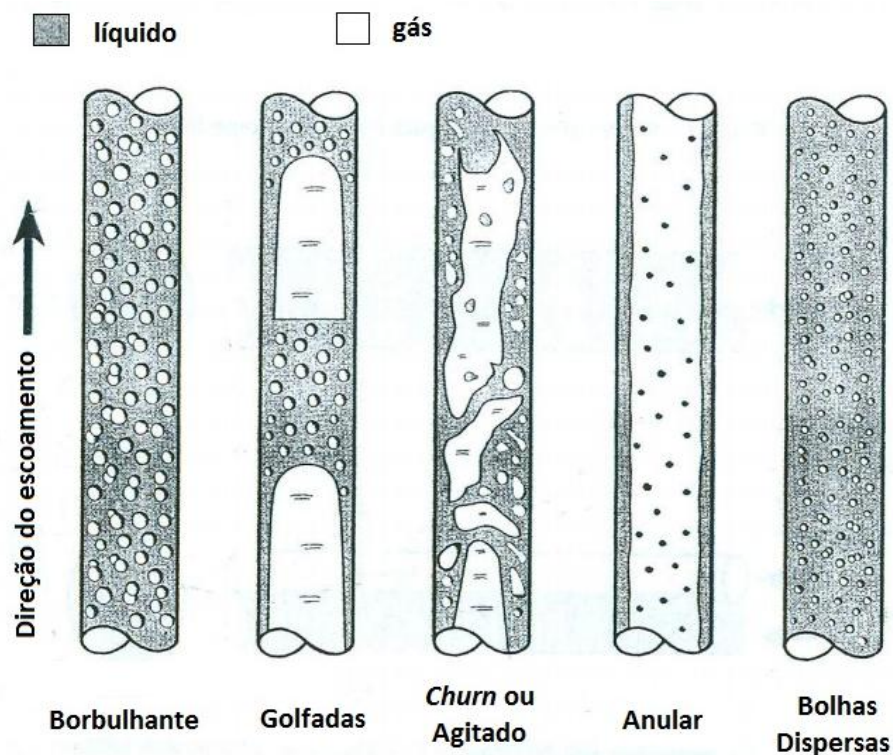


**Figura 1 – Padrão de escoamento em tubulação horizontal.**  
**Fonte: Adaptado de Shoham (2006).**

O padrão Estratificado ocorre em baixas velocidades de líquido e gás, onde a gravidade encarrega-se de separar as fases de forma bem clara. Com o aumento da velocidade do gás ocorre uma ondulação na interface e por isso é subdividido em regime Ondulado e Suave. Já o Intermitente é caracterizado pela alternância entre gás e líquido, a presença de bolhas no pistão de líquido gera a subdivisão em Bolhas alongadas e Golfadas. Atingindo altas vazões de gás, a fase gasosa domina o escoamento concentrando o líquido nas bordas da tubulação, o líquido também aparece em forma de minúsculas bolhas dispersas no gás, nesse caso, o escoamento é dito Anular. Com a diminuição da velocidade do gás, a predominância do gás no centro diminui e surge uma ondulação do líquido, por isso a subdivisão em Anular ondulado. Nas altas vazões de líquido o escoamento de Bolhas Dispersas predomina e assim o gás aparece em forma de bolhas espalhadas quase que uniformemente pela tubulação, à

medida que se diminui a velocidade do líquido as bolhas começam a se concentrar na parte de cima da tubulação.

Quando a tubulação está na vertical ou com uma inclinação muito próxima disso, a separação uniforme entre líquido e gás não ocorre mais, devido à mudança da aplicação da força da gravidade, assim não se observa o padrão estratificado. Entretanto um novo padrão é observado, o regime *Churn* ou Agitado. Na Figura 2, tem-se a distinção de 5 padrões de escoamento verticais, segundo Shoham (2006).



**Figura 2 – Padrão de escoamento em tubulação vertical.**  
**Fonte: Adaptado de Shoham (2006).**

Nas baixas vazões de líquidos e gás observam-se bolhas discretas numa fase contínua de líquido, nesse regime de Bolhas Dispersas, as mesmas descrevem um movimento oscilatório e se distribuem de forma quase que uniforme pela tubulação. Com o aumento da vazão do gás, as bolhas coalescem formando as bolhas de Taylor que se alternam com o pistão de líquido, dando origem ao escoamento em Golfadas. Além da intermitência esse regime é fortemente caracterizado pela sua simetria. Aumentando ainda mais a vazão do gás, as bolhas de Taylor se afinam e se distorcem provocando um movimento oscilatório na fase líquida, que caracterizam o escoamento *Churn* ou Agitado. Apesar deste regime parecer ser

caótico, já existem estudos apontando que, para alguns casos, ele exibe um comportamento estacionário (HERNANDEZ PEREZ et al., 2010). Quando o gás circula no centro da tubulação carregando minúsculas bolhas do líquido, tem-se o fluxo Anular. Nele, o líquido circula nas paredes do tubo em baixa velocidade, formando um filme uniforme. Nas altas vazões de líquido e baixas vazões de gás, pequenas bolhas são levadas pelo líquido de maneira similar ao horizontal, por isso recebe o nome de Bolhas Dispersas. Sua característica fundamental é a uniformidade e o não escorregamento de velocidade entre as fases que torna o regime homogêneo.

Os limiares de transição entre um padrão e outro (obtidos empiricamente através de visualização) são descritos na forma gráfica denominada de mapa de fluxo. Nele cada eixo representa a variação da vazão da fase pela área da seção do tubo. Nas Figuras 3 e 4 são mostrados dois exemplos de mapas de fluxo para escoamento horizontal e vertical, respectivamente. As linhas traçadas delimitam a região de transição de um regime para outro. Os mapas de fluxo devem ser utilizados como uma forma de orientação apenas, pois eles dependem fortemente de parâmetros relacionados com o experimento realizado como, por exemplo, o diâmetro do tubo, as propriedades físicas das fases e a pressão.

É importante salientar que numa boa parte dos padrões de escoamentos é possível observar a presença de pequenas bolhas dispersas, e não somente naqueles que são denominados por essa característica marcante. O escoamento em Golfadas, por exemplo, apresenta formação de bolhas dentro do pistão de líquido. Assim como no Estratificado Ondulado ou o *Churn* também nota-se a presença delas. Na transição entre padrões, muitas vezes, nota-se a ocorrência de bolhas até que o escoamento atinja o regime. Por isso elas são tão importantes quando se estuda escoamentos bifásicos gás-líquido, e, desenvolver técnicas que permitam determinar sua posição, velocidade, diâmetro equivalente de esfera, evolução temporal, dentre outros, é essencial para atingir a compreensão total de todos os outros padrões de escoamentos em que elas aparecem.

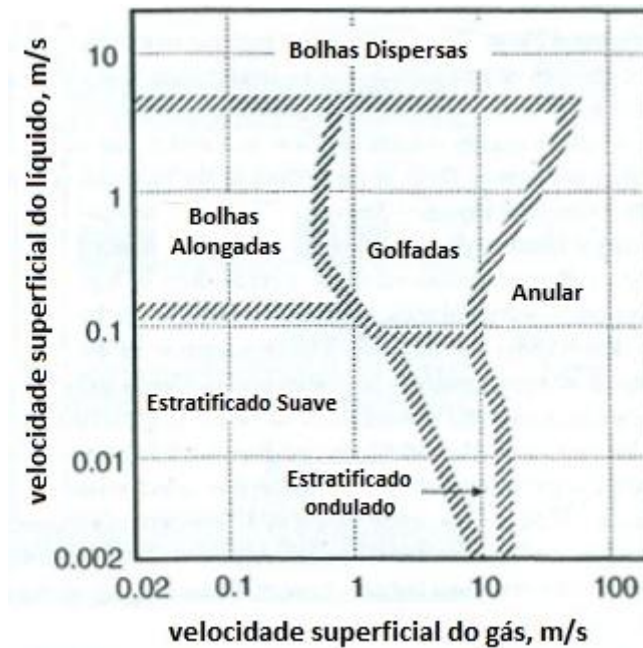


Figura 3 – Mapa de fluxo para um escoamento bifásico horizontal ar-água para uma tubulação de 2,5cm de diâmetro a 25°C e 1 bar de pressão descrito por Mandhane, Gregory e Aziz (1974). A velocidade superficial é dada pela vazão da fase considerada pela área da seção da tubulação.  
Fonte: Adaptado de Shoham (2006).

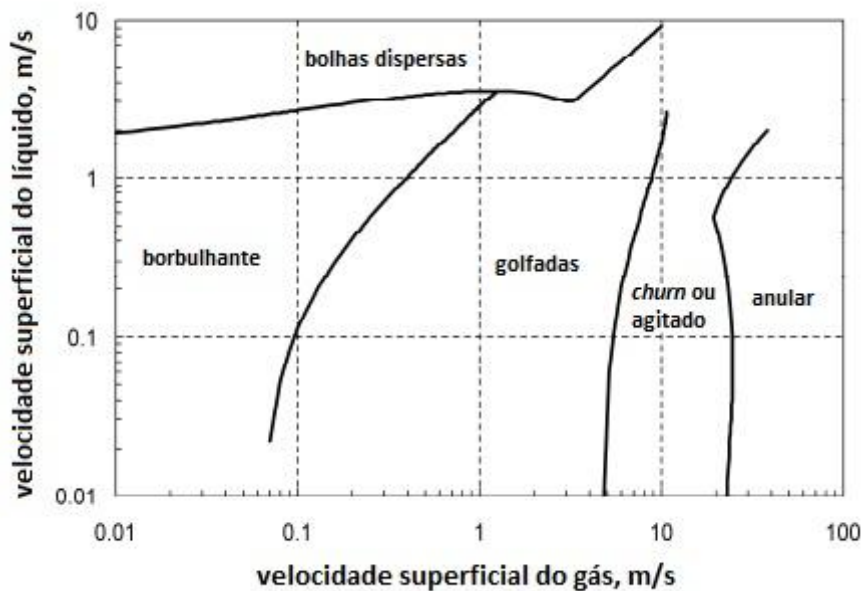
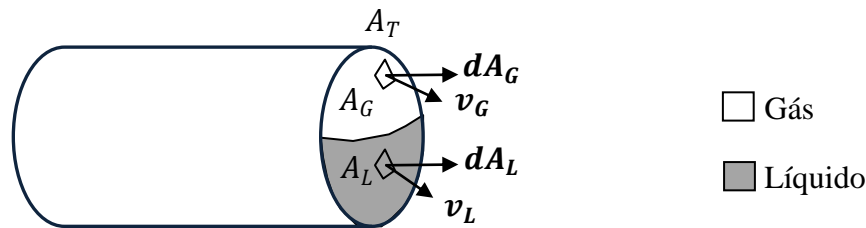


Figura 4 – Mapa de fluxo para um escoamento bifásico vertical ar-água para uma tubulação de 6,7cm de diâmetro como descrito por Azzopardi et al. (2008). A velocidade superficial é dada pela vazão da fase considerada pela área da seção da tubulação.  
Fonte: Adaptado de Da Silva (2008).

### 2.1.1 Equações do escoamento bifásico

Considere um escoamento interno (Figura 5), bifásico, onde os fluidos são considerados incompressíveis.



**Figura 5 – Diagrama vetorial das velocidades para um escoamento bifásico.**  
Fonte: Autoria própria.

Seja  $d\mathbf{A}_L$  um vetor, definido como o produto do vetor normal,  $\mathbf{n}$  (mesmo sentido do escoamento), por um escalar diferencial de área,  $dA_L$ . E  $\mathbf{v}_L$  a quantidade vetorial que caracteriza a velocidade por  $dA_L$ . Considerando o efeito da viscosidade, então  $\mathbf{v}_L$  apresentará diferentes valores para cada diferencial de área considerado. A módulo da velocidade média espacial que a fase líquida apresenta na área da seção,  $A_L$ , é

$$\bar{v}_L = \frac{1}{A_L} \int_x \int_y v_L(x, y) dy dx. \quad (1)$$

A vazão volumétrica do líquido através da seção da superfície de área  $A_L$  é dada por

$$q_L = \int_{A_L} \bar{v}_L d\mathbf{A}_L, \quad (2)$$

onde o vetor  $\bar{\mathbf{v}}_L$  tem módulo dado por  $\bar{v}_L$  e com o sentido e direção dados pela média das componentes dos 3 eixos coordenados de cada diferencial de área do fase líquida. Um escoamento laminar monofásico plenamente desenvolvido pode ser considerado unidimensional, que implica que  $\bar{\mathbf{v}}_L$  e  $d\mathbf{A}_L$  tem mesmo sentido e direção. Dessa forma a equação (2) pode ser reescrita como

$$q_L = \int_{A_L} \bar{v}_L dA_L = \bar{v}_L A_L = \int_x \int_y v_L(x, y) dy dx. \quad (3)$$

A equação (3) também pode ser utilizada para escoamentos turbulentos desde que  $v_L$  seja obtido através de média temporal. Quando se utiliza técnicas de estimação de velocidade, pode-se estimar a vazão pela somatória dos pontos de velocidades medidos conforme mostra a equação(3).

De forma similar, a equação da vazão em volume do gás é dada por

$$q_G = \int_{A_G} \bar{v}_G dA_G = \bar{v}_G A_G = \int_x \int_y v_G(x, y) dy dx. \quad (4)$$

Considerando a área total da fase gasosa,  $A_G$ , e relacionando-a a área total da seção do tubo,  $A_T$ , obtém-se a fração da área do gás ocupada no tubo, também denominada de fração de vazio, caracterizada pela equação

$$\gamma = \frac{A_G}{A_T}. \quad (5)$$

Através da definição anterior, pode-se então relacionar, a área ocupada pelo líquido, como:

$$A_L = (1 - \gamma)A_T \quad (6)$$

Portanto pode-se calcular as vazões volumétricas de cada fase, bastando saber a velocidade de cada fase e a fração de área ocupada pelo gás, como mostra as equações abaixo:

$$q_G = \bar{v}_G \gamma A_T, \quad (7)$$

$$q_L = \bar{v}_L (1 - \gamma) A_T. \quad (8)$$

A velocidade superficial é a velocidade que a fase teria se estivesse escoando sozinha na tubulação e é definida como

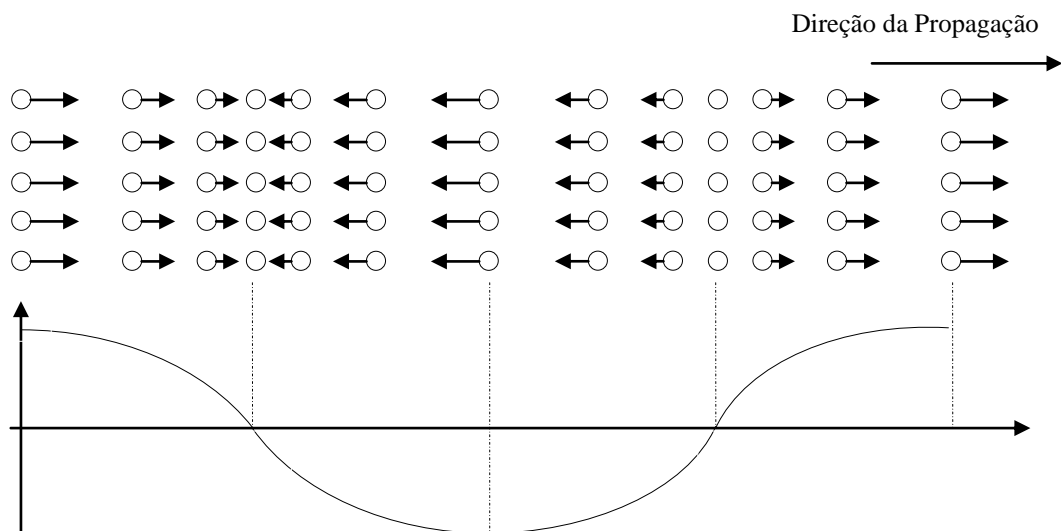
$$J_G = \frac{q_G}{A_T}, \quad (9)$$

$$J_L = \frac{q_L}{A_T}, \quad (10)$$

onde  $J_G$  e  $J_L$  são as velocidades superficiais das fases gasosa e líquida respectivamente.

## 2.2 FUNDAMENTOS DE ULTRASSOM

Ultrassom consiste de ondas mecânicas produzidas por uma fonte que empurra e puxa o meio de propagação numa frequência de vibração acima de 20 kHz. Este distúrbio provoca o movimento das partículas do meio, mas não ocorre transporte de massa, pois as partículas oscilam em torno da sua posição média. Se a oscilação ocorre na direção da propagação a onda é dita longitudinal, como mostrado na Figura 6. Caso a oscilação ocorra perpendicular à propagação a onda é denominada transversal.



**Figura 6** – Deslocamento das partículas do meio devido a uma perturbação acústica relativo a um determinado instante de tempo. Os vetores representam a magnitude e direção da velocidade. Abaixo o correspondente gráfico da variação da pressão no meio.

Fonte: Adaptado de Jensen (2008).

A fonte normalmente utilizada é um transdutor no qual o elemento que produz as vibrações é um cristal piezelétrico de cerâmica excitado por um sinal de tensão apropriado. Em geral, para a aplicação da técnica Doppler são utilizados transdutores com frequência de vibração entre 1 e 10 MHz.

O distúrbio provocado pela fonte se move com velocidade que depende da densidade média do meio,  $\rho$ , e da compressibilidade adiabática,  $k_a$ , dados por

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho k_a}}, \quad (11)$$

sendo  $k_a$  dado em  $\text{m}^2/\text{N}$ .

Uma partícula se desloca proporcionalmente a pressão aplicada pela fonte e inversamente à impedância acústica que o meio oferece a passagem da onda, portanto

$$u = \frac{p}{Z}, \quad (12)$$

onde  $Z$  é a impedância acústica do meio, definida como o produto da densidade pela velocidade do som no meio,

$$Z = \rho c. \quad (13)$$

A impedância acústica é dada em  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  ou em Rayls. A Tabela 1 relaciona os valores de densidade, velocidade do som no meio e impedância acústica para alguns materiais.

**Tabela 1 – Densidade e parâmetros acústicos para alguns materiais ou substâncias.**

Material/ Substância	Densidade ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Velocidade ( $\text{m}/\text{s}$ )	Impedância (MRayls)	Atenuação $\text{dB}/\text{cm}$ , 5MHz
Acrílico	1119	2750	3,26	6,4
Nylon	1120	2600	2,90	2,9
ABS	1050	2250	2,36	10,9
Polycarbonato	1180	2270	2,69	24,9
Vidro	2240	5640	13,1	0,24

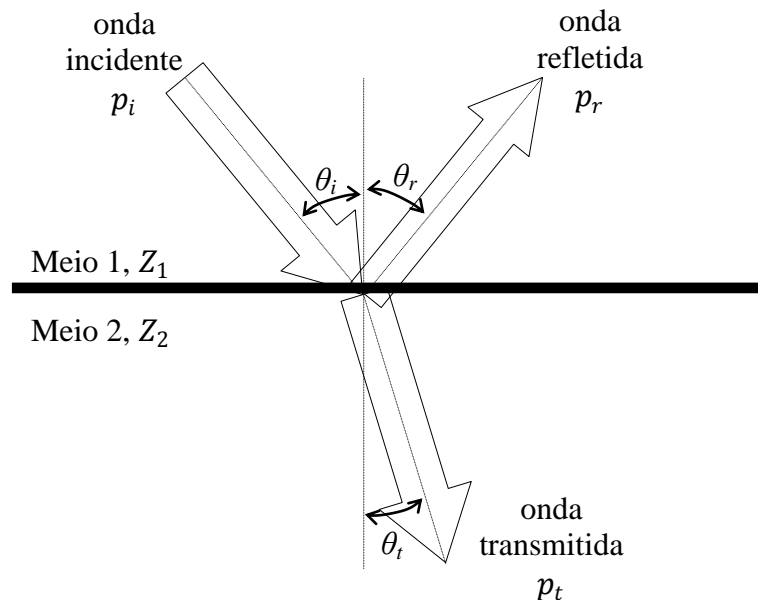


**Tabela 1 – Densidade e parâmetros acústicos para alguns materiais ou substâncias.**

Material/ Substância	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Velocidade (m/s)	Impedância (MRayls)	Atenuação dB/cm, 5MHz
Ferro	7690	5900	46,4	0,29
Parafina	1500	1500	2,30	-
Glicerina (25°C)	1260	1904	2,34	-
Óleo SAE20	870	1740	1,51	-
Água (25°C)	998	1496,7	1,494	-
Ar	1293	331,14	0,4286	-
CO <sub>2</sub> (0°C)	1977	259	0,512	-
CO (0°C)	1250	338	0,423	-

Fonte: Adaptado de Selfridge (1985).

Quando uma onda ultrassônica atinge um meio de propriedades muito diferentes daquele em que se encontra, parte da onda será refletida e outra parte atravessará a interface, porém, propagando-se em uma nova direção, como mostra a Figura 7.



**Figura 7 – Comportamento interfacial de uma onda plana quando encontra uma interface. Uma onda acústica plana colide na interface do meio 2 com ângulo  $\theta_i$  em relação a normal, parte dela atravessa para o meio 2 com ângulo  $\theta_t$  e parte é refletida com ângulo  $\theta_r$ .**

Fonte: Adaptado de Jensen (2008).

O ângulo da onda refletida é igual ao da onda incidente e os ângulos de incidência e transmissão,  $\theta_i$  e  $\theta_t$  estão relacionados por

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\text{sen}\theta_t}{\text{sen}\theta_i}, \quad (14)$$

através da lei de Snell, onde  $c_1$  e  $c_2$  são as velocidades de propagação nos respectivos meios.

A taxa de pressão transmitida em relação à incidente pode ser obtida através de (JENSEN, 2008):

$$T = \frac{2Z_2 \cos\theta_i}{Z_2 \cos\theta_i + Z_1 \cos\theta_t} = \frac{p_t}{p_i}, \quad (15)$$

sendo  $Z_1$  e  $Z_2$  a impedância acústica do meio 1 e 2, respectivamente, e  $T$  denominado de coeficiente de transmissão.

A proporção da pressão incidente que é refletida, é denominada de coeficiente de reflexão,  $R_r$ , dado por (JENSEN, 2008):

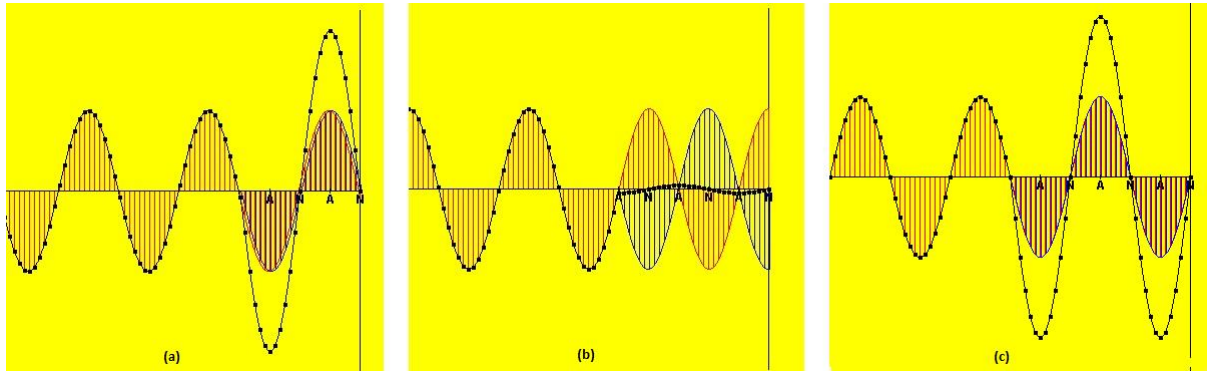
$$R_r = \frac{Z_2 \cos\theta_i - Z_1 \cos\theta_t}{Z_2 \cos\theta_i + Z_1 \cos\theta_t} = \frac{p_r}{p_i}. \quad (16)$$

Quando a onda incide com ângulo zero ou com um ângulo muito pequeno pode-se simplificar a equação (16) para

$$R_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (17)$$

Se  $Z_2 > Z_1$ ,  $R_r$  será um número positivo, enquanto que, se  $Z_1 > Z_2$ ,  $R_r$  será menor que zero. Esse sinal negativo no coeficiente de reflexão significa que a onda refletida estará defasada de 180 graus em relação à incidente. Quando isso ocorre, próximo à interface dos meios, observa-se um fenômeno denominado de onda estacionária, ilustrado na Figura 8. Ela se origina da superposição da onda incidente com a onda refletida defasada de 180 graus. O resultado prático é que a onda de pressão acústica nessa região não se propaga, portanto, se um ponto do espaço se localiza onde ocorre o máximo de interferência construtiva ele receberá grandes variações de pressão, enquanto que outro localizado perto do cruzamento com zero, quase não sofre a influência da pressão acústica. Assim, mesmo que um elemento

com alto índice de reflexão esteja localizado nesse ponto de pressão nula, não será observado nenhum eco originado dele.



**Figura 8 – Sequência de ilustrações de demonstram a formação de uma onda estacionária. Uma onda incidente (cor vermelha) colide com a interface na parte direita resultando num coeficiente de reflexão  $R=-1$ . Em (a) a onda refletida (cor azul) se superpõe a incidente de forma construtiva, resultando numa onda de pressão com o dobro de amplitude (cor preta). Em (b) ocorre a situação contrária onde a interferência das duas ondas é destrutiva. Em (c) ocorre novamente a superposição construtiva, contudo os máximos resultantes se alternam em relação a (a). Note que perto do ponto N a pressão resultante é sempre menor que nos outros pontos.**

Fonte: Adaptado de <http://www.walter-fendt.de/ph14e/stwaveref1.htm>

### 2.2.1 Espalhamento

As equações e leis apresentadas anteriormente supunham a incidência de uma onda plana em uma interface de diferente impedância acústica perfeitamente plana. Contudo este tipo de interface não é comumente encontrado na prática. Quando uma onda ultrassônica propagando-se em um meio atinge uma interface de outro meio, de diferente densidade e com dimensões similares ou menores que seu comprimento de onda, uma parte da energia desta onda é espalhada em várias direções dando origem ao fenômeno denominado de espalhamento. Também referenciado através do termo *scattering*, o espalhamento é o processo fundamental envolvido na medição por ultrassom, pois é devido a ele que é possível o recebimento dos ecos necessários para estimação de velocidade através da técnica Doppler (EVANS, 1989). Na área médica, os glóbulos vermelhos funcionam como elementos espalhadores refletindo a onda ultrassônica em diversas direções e tornam viável a estimação da velocidade do sangue. Em aplicações industriais para medição de velocidade de

escoamento, é necessária a inserção de micro bolhas ou partículas microscópicas para servir de elementos refletoras, propiciando a medição da velocidade do escoamento dentre outras aplicações. Como o espalhamento resulta de várias fontes de reflexão é apropriado que ele seja modelado através de métodos estatísticos. É dito que sua amplitude segue uma distribuição Gaussiana e, portanto, ele pode ser totalmente caracterizado pela sua média e variância. Assim, se os ecos sucessivos de elementos espalhadores em movimento forem correlacionados, pode-se detectar o deslocamento de posição, tornando possível a medição da velocidade (JENSEN, 2008).

## 2.2.2 Características dos transdutores

O transdutor de ultrassom é o elemento que converte energia elétrica em pressão acústica e vice-versa. Algumas propriedades e relações importantes que são utilizadas no decorrer desta Tese são revisadas nesta subseção de forma sucinta. Uma completa discussão sobre esse assunto pode ser encontrada em Christensen (1988) e Shung (2005).

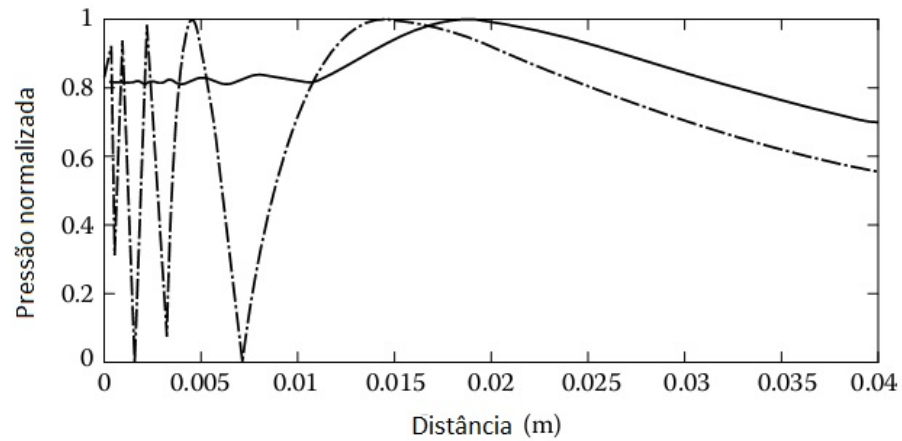
Para obter uma boa resolução axial, o sinal elétrico enviado ao transdutor precisa ser pulsado, para que a onda acústica seja também pulsada. Assim a profundidade onde se localiza a interface (por exemplo, água-ar) pode ser medida pelo tempo de ida e volta do pulso acústico. Quanto menor a duração do pulso melhor a resolução axial do transdutor, de maneira aproximada pode-se utilizar a seguinte equação para determinar a resolução axial (CHRISTENSEN, 1988):

$$AR = \frac{n_c \lambda}{4}, \quad (18)$$

onde  $n_c$  é o número de ciclos gerados numa emissão e  $\lambda$  o comprimento de onda no meio objeto do estudo. Como  $\lambda = c/f$ , e considerando que transdutores que emitem a mesma quantidade de pulsos, o aumento da frequência de emissão melhora a resolução axial.

O transdutor é caracterizado pela distribuição espacial do campo acústico por ele gerado. Considerando um transdutor cilíndrico de diâmetro ativo,  $D_A$ , e tomando a linha que inicia no centro da face circular e que se expande na direção do eixo axial, como abscissa  $z$ , e

fazendo-se o gráfico da variação da pressão pelo espaço por  $z$  para certo tempo  $t$ , obtém-se o gráfico da Figura 9.



**Figura 9 – Perfil de pressão axial com a distância para disparo contínuo e pulsado. Relativo a um transdutor circular de 3,5 MHz e 3 mm de diâmetro. Linha pontilhada corresponde à excitação contínua do transdutor. Linha contínua a excitação pulsada.**

Fonte: Adaptado de Shung (2005).

A região onde ocorrem rápidas variações do campo acústico é denominada de Campo Próximo (*Near Field*). Já para pontos distantes do transdutor, a pressão acústica cai inversamente com a distância, e essa região é denominada de Campo Distante (*Far Field*). O início do campo distante é dado por

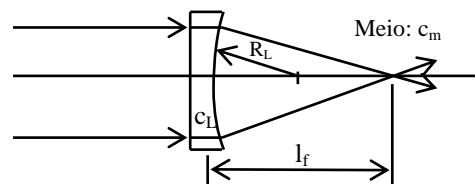
$$z_R = \frac{D_A^2}{4\lambda}, \quad (19)$$

onde a dedução da equação (19), que governa a transição, está fora do escopo desta Tese e pode ser encontrada em Christensen (1988). Para fins de medição é desejável que o campo acústico seja o mais uniforme possível, portanto as medições devem ser realizadas a partir do limite estabelecido pela equação (19) (TAKEDA, 2012).

O transdutor é também caracterizado pela dispersão angular do seu feixe. Isto é feito através do cálculo de um ângulo,  $\phi_d$ , que mede a divergência do feixe emitido por um transdutor cilíndrico, que sai do menor valor angular, até o ponto de meia potência (-3 dB) e é dado pela equação (CHRISTENSEN, 1988)

$$\phi_d = \text{arc sen} \left( 0,61 \frac{\lambda}{D_A} \right). \quad (20)$$

As lentes são frequentemente empregadas no campo da óptica para focalizar, colimar e divergir um feixe de luz. Pode-se empregar lentes de forma similar para as ondas acústicas também. Como as lentes acústicas são de material que geralmente possui velocidade acústica maior que o meio, diferente das lentes ópticas, as lentes convergentes acústicas se apresentarão em formato côncavo. Na Figura 10 tem-se um diagrama em corte de uma lente plano-côncava.



**Figura 10 – Lente convergente feita de um material com velocidade maior que a do meio.**  
**Fonte: Adaptado de Christensen (1988).**

A distância focal da lente da Figura 10 é dada pela equação (CHRISTENSEN, 1988)

$$l_f = \frac{R_L}{1 - \frac{c_m}{c_L}}, \quad (21)$$

onde  $c_L$  é a velocidade com que o som se propaga na lente,  $c_m$  é a velocidade de propagação do som no meio no qual a onda é focalizada e  $R_L$  o raio de curvatura da lente.

A utilização de lentes convergentes cria uma região central densa, onde grande parte da pressão acústica é aplicada. Para um transdutor acústico circular essa região também é circular e possui diâmetro dado por (CHRISTENSEN, 1988)

$$d_L = 2,44 \left( \frac{l_f}{D_A} \right) \lambda. \quad (22)$$

A equação (22) determina também qual a menor distância entre dois objetos que o transdutor consegue distinguir, ou seja,  $d_L$  também define o parâmetro denominado de resolução lateral do transdutor.

Focalizar o feixe de ultrassom melhora a sua resolução lateral, entretanto as regiões antes e depois do foco ficam comprometidas. A profundidade do foco é definida como a distância simétrica no ponto focal, onde o feixe mantém aproximadamente as características do feixe focalizado, e é dada pela relação (CHRISTENSEN, 1988):

$$D_f = 3 \left( \frac{l_f}{D_A} \right)^2 \lambda. \quad (23)$$

## 2.3 REVISÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

Um escoamento interno bifásico é caracterizado pelas vazões em volume de cada fase. Na seção 2.1.1 mostrou-se que as vazões volumétricas podem ser obtidas através da medição da fração de vazio e a velocidade de cada fase. Esta seção abrange a revisão das técnicas que se dedicam a medir esses dois parâmetros.

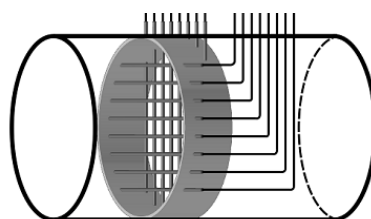
Determinar a localização espaço-temporal da interface entre fase gasosa e líquida é a tarefa principal na obtenção da fração de vazio. Quando é possível visualizar diretamente o escoamento, o emprego da filmagem em alta velocidade permite identificar de forma acurada a posição das interfaces. (ZARUBA et al., 2005). Apesar do limitado campo de aplicações em que pode ser empregado, afinal não serve para líquidos opticamente opacos, além de que, para tubulações pressurizadas, pode ser inviável ter uma janela de visualização, esta metodologia mostrou ser uma ferramenta valiosa na validação de novas técnicas devido a apresentar resoluções espaciais da ordem de micrômetros e temporal na ordem de milissegundos. Outra forma de empregar o princípio óptico é através do uso de sondas ópticas. Nesse caso é utilizada a diferença entre o índice de refração das fases para resolver a posição. (CARTELLIER, 1991; CARTELLIER; BARRAU, 1998). Utilizando-se uma fibra óptica emitindo, dentro do escoamento, a intensidade da luz refletida estará correlacionada com a interface entre os meios. Segundo Chanson (2002) nas frações de vazio superiores a 10~15%

as sondas mais confiáveis são as ópticas e de impedância. Entretanto, ela continua a ter a mesma limitação da visualização por filmagem, ou seja, só pode ser aplicada em líquidos opticamente transparentes. Além disso, como é intrusiva ao escoamento, a sonda acaba perfurando as bolhas de gás, alterando o tempo em que a bolha reside dentro da sonda, o que acarreta erros na sua detecção (JULIÁ et al., 2005).

As técnicas baseadas na medição de condutância não sofrem a limitação de opacidade, contudo precisam que as fases envolvidas tenham uma diferença significativa de condutividade. Escoamento água-ar é favorável para utilização de sondas resistivas. Ademais, podem ser montadas em formato de anéis metálicos no interior da tubulação passando de intrusivas para invasivas (FOSSA, 1998). Baseiam-se na detecção da corrente que circula entre dois eletrodos que estão sob a ação de um campo elétrico. A dificuldade surge quando as fases tem condutância muito baixa, como por exemplo, escoamentos óleo-gás. A solução para esse tipo de caso é substituir a medição da condutividade pela permissividade. Assim as técnicas conhecidas também como capacitivas se desenvolveram. Seu funcionamento está ligado no fato que substâncias com permissividades distintas fluindo através de duas placas metálicas irão causar diferentes valores de capacitância (HAMMER et al., 2006). Foi demonstrado que os transdutores capacitivos podem ser instalados por fora da tubulação, não interferindo no escoamento (STOTT, 1985). Entretanto, sua medição da fração de vazio depende do padrão do escoamento, proporcionando melhores resultados quando as fases estão numa mistura homogênea (HAMMER et al., 2006).

Com o passar do tempo, as sondas evoluíram para as malhas de eletrodos ou *wire-mesh*. Consistindo de dois conjuntos de fios rígidos, perpendiculares entre si, esticados através da seção da tubulação e com um pequeno afastamento axial entre eles, como mostra a Figura 11. Seu funcionamento consiste em medir a condutância entre os pontos de cruzamento dos fios (PRASSER, 1998), tendo como diferencial a resolução temporal, que vai até 0,1 milissegundos, o que permite avaliar transientes extremamente rápidos em escoamentos. Já a resolução espacial é limitada a quantidade de fios que é possível arranjar na seção da tubulação, em geral a menor resolução atingida é de dois milímetros. Como o escoamento precisa atravessar a malha para ser mensurado, esse tipo de técnica é intrusiva. A preocupação deste arranjo poder afetar o escoamento como um todo é notável, devido ao seu alto grau de intrusão, mas, ainda assim, é provado que ela só afeta o escoamento após o mesmo atravessá-lo (PRASSER et al., 2001; WANGJIRANIRAN et al., 2003 )





**Figura 11 – Esquema ilustrativo da malha de eletrodos ou *wire-mesh*.**  
**Fonte: Adaptado de Da Silva (2008).**

Apesar dos avanços nas resoluções espacial e principalmente temporal, o trabalho de Prasser (1998) tem a limitação intrínseca dos princípios baseados em condutância: a de necessitar que uma das fases tenha alta condutividade. Dessa forma ficava impossibilitado de aplicá-lo a casos onde a fase contínua é pouco condutiva, como o escoamento óleo-gás, que é muito encontrado na indústria petrolífera. Com o trabalho de DaSilva (2008) a malha de eletrodos foi alterada para discriminar fluidos com diferentes valores de permissividade, ou seja, agora é medido o valor da capacitância entre cada cruzamento de fios, superando as limitações anteriores, e permitindo ainda medir frações de água em óleo, devido a grande diferença de permissividade entre esses dois fluidos. Os avanços nesta técnica a tornaram uma excelente metodologia para visualização do escoamento e para validação de novas tecnologias de medição, já que, não obstante todas as vantagens, ela não encontra aplicação industrial devido a seu caráter intrusivo.

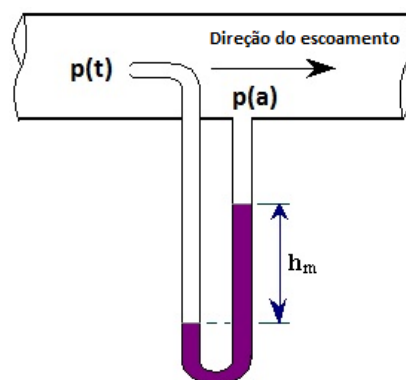
O emprego de técnicas nucleares, como os raios-X, raios- $\gamma$ , etc, por exemplo, obtém a fração de vazio medindo a atenuação que radiação sofre ao atravessar a seção da tubulação, se valendo da diferença que existe entre os coeficientes de absorção de gás e líquido. Normalmente é empregado um sistema mecânico de rotação da fonte do feixe para que o mesmo possa varrer toda a seção do tubo e isso acaba limitando bastante a sua resolução temporal. Existem soluções que utilizam múltiplos feixes e receptores que conseguem reduzir bastante o tempo entre as medições, todavia o custo do sistema que já é alto para uma única fonte torna-se proibitivo além de aumentar consideravelmente a complexidade da técnica (DaSILVA, 2008).

Recomenda-se consultar DaSilva (2008), Hammer et al. (2006) e Boyer, Duquenne e Wild (2002) para mais detalhes e outras classificações das técnicas que objetivam a obtenção de fração de vazio.

Por outro lado tem-se as técnicas que se dedicam a medir a velocidade dos escoamentos. Um dos métodos mais antigos para estimar a velocidade de fluidos é o Tubo de Pitot. Concebido por Henri Pitot em 1724, para medição da velocidade de rios e mais tarde adaptado para medir velocidade de líquidos em tubulações. (MAVROS, 2001). A Figura 12 exemplifica como é feita a montagem desse transdutor de velocidade. Posicionando um pequeno tubo em oposição ao fluxo do líquido, a diferença de pressão do orifício da ponta do tubo,  $p(t)$ , para um orifício na lateral da tubulação,  $p(a)$ , estará relacionado ao quadrado da velocidade instantânea do líquido no ponto do orifício no tubo de Pitot, dado pela equação de Bernoulli

$$v_p = \sqrt{\frac{2[p(t) - p(a)]}{\rho_L}}, \quad (24)$$

onde  $\rho_L$  é a densidade do líquido. Existem implementações deste sensor miniaturizada com arranjos que permitem medir o componente da velocidade em 3 dimensões, ou seja, o vetor velocidade. Apesar disso, é preciso notar que ele é um sensor intrusivo, portanto afeta o escoamento, principalmente em tubo com diâmetros comparáveis ao do sensor. Também apresenta resposta lenta, logo transições muito rápidas na velocidade não são detectadas.



**Figura 12 – Ilustração genérica de um medidor de velocidade Pitot adaptado para tubulações. Um tubo com um pequeno orifício é posicionado contra o fluxo do fluido enquanto que a outra extremidade fica na parede da tubulação transversal a direção do escoamento.**

**Fonte:** Adaptado de [http://www.flowmeterdirectory.com/flowmeter\\_orifice\\_plate.html](http://www.flowmeterdirectory.com/flowmeter_orifice_plate.html).

Contrastando à anterior, o Anemômetro de fio-quente apresenta resposta rápida a variações na velocidade. Ele detecta a velocidade do escoamento percebendo as mudanças

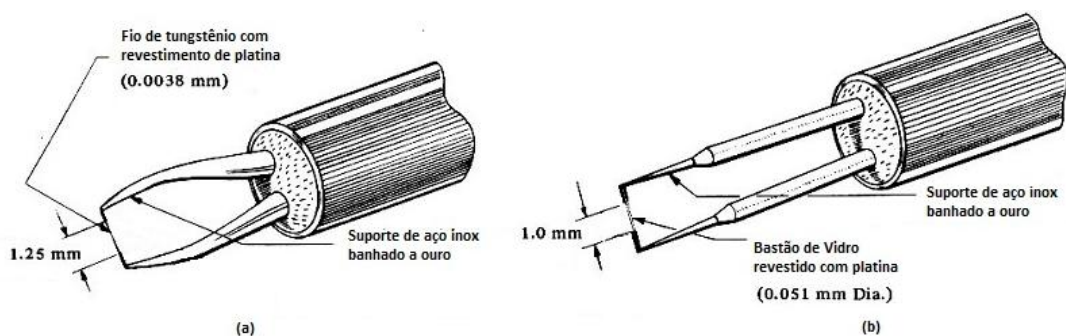
que ocorrem na transferência de calor de um elemento aquecido exposto ao fluxo das fases. O elemento utilizado pode ser tanto um fio de diâmetro típico de 5  $\mu\text{m}$  ou um filme quente que é utilizado em aplicações onde o escoamento facilmente quebraria o fio.

A Figura 13 mostra uma realização desta técnica. Assumindo uma relação linear da resistência do elemento com a temperatura pode-se modelar a resistência  $R$  do sensor como (FINGERSON; FREYMUTH, 1996)

$$R_m = R_f [1 - \mu(T_M - T_f)]. \quad (25)$$

O parâmetro  $R_f$  é a resistência do elemento na temperatura de referência  $T_f$  e  $T_M$  é a temperatura média do sensor. O coeficiente de temperatura,  $\mu$ , que depende do material utilizado, é crítico, pois, se ele não for suficientemente alto o sensor não produzirá variações perceptíveis na resistência  $R_m$ . Se a resistência de referência,  $R_f$ , for alta relativamente à  $R_m$ , então a corrente que passa no sensor para provocar seu aquecimento é aproximadamente constante. Com a passagem de um líquido por ele, dependendo da sua velocidade, o elemento trocará calor com o meio, resfriando-se, diminuindo  $R_m$ . A diminuição na resistência pode ser medida através da utilização de uma ponte resistiva, por exemplo.

O material utilizado no fio ou filme é geralmente tungstênio ou platina, em parte pelo fato da resistência deles variar muito com o aumento da temperatura, ou seja, apresentam um alto  $\mu$  e também por serem mecanicamente muito resistentes a fraturas ou quebras mesmo com bitolas da ordem de micrômetros (dimensão comumente empregada por resultar em alta resistência do fio,  $R_f$ ).

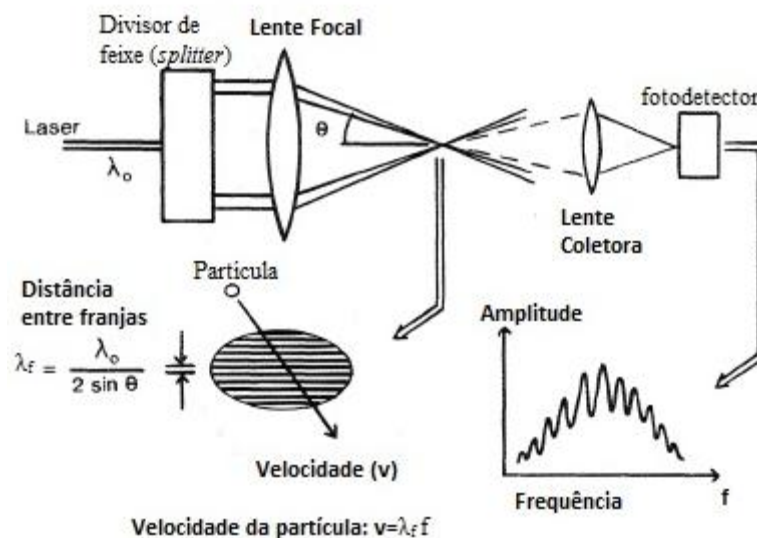


**Figura 13 – Ilustração da montagem típica de um anemômetro de fio/filme quente. Em (a) é mostrado uma sonda de velocidade de utiliza um fio de tungstênio revestido de platina como elemento sensor. Em (b) o elemento transdutor é um filme de platina revestido num cilindro de vidro.**

Fonte: Adaptado de <http://www.dept.aoe.vt.edu/~simpson/aoe4154/hotwirelab.pdf>.

Existem muitas variações nos formatos e arranjos dos elementos sensores do anemômetro, por exemplo, o emprego de 3 fios com objetivo de obter o vetor de velocidades do fluido, sensores de filmes cônicos, etc. A utilização de sondas de dimensões reduzidas em relação a tubulação possibilita o estudo detalhado do campo de velocidades de escoamentos. A grande desvantagem do anemômetro está na restrição de só poder ser utilizado em escoamentos onde a temperatura, composição e pressão das fases são constantes, além de necessitar estar dentro do escoamento. Para um estudo mais detalhado sobre o funcionamento do anemômetro de fio quente recomenda-se Fingerson e Freymuth (1996). Em Stainback e Nagabushana (2002) é feita uma revisão mais atualizada desta técnica aplicada a escoamentos.

A medição de velocidade através de Laser por efeito Doppler também conhecida por LDV (*Laser Doppler Velocimetry*) é uma opção interessante pois é não intrusiva ao escoamento. A sua configuração mais empregada é mostrada na Figura 14.



**Figura 14 – Diagrama simplificado da implementação mais comum da técnica LDV. Um feixe de laser é dividido em dois, que são focados para se interceptar num volume alvo da medição. A interferência dos feixes forma franjas. Uma partícula cruzando esse volume espalha os dois feixes, provocando um desvio Doppler na frequência recebida pelo fotodetector.**

Fonte: Adaptado de Ereat (2011).

Uma fonte de laser com comprimento de onda,  $\lambda_0$ , emite um feixe que é dividido por um *splitter*. Os dois feixes coerentes resultantes são focados com o auxílio de uma lente de forma a se interceptarem num pequeno volume da tubulação que será o alvo da medição. A

interferência dos dois feixes resulta em pontos de máxima luminosidade e total ausência de luz, igualmente espaçados, formando um padrão denominado de franjas. A distância entre as franjas é dada por: (MAVROS, 2001)

$$\lambda_f = \frac{\lambda_o}{2\text{sen}(\theta_f)}, \quad (26)$$

onde  $2\theta_f$  é o ângulo formado entre os feixes focados.

Neste método, para se medir a velocidade, diferente das técnicas anteriores, é preciso inserir partículas que se movam numa velocidade muito próxima a do fluido alvo da medição. A passagem dessas partículas pelo volume onde os feixes se interceptam irá espalhar a luz, que terá sua frequência modificada proporcionalmente à velocidade da partícula,  $v_{LDV}$ , dada por

$$f_{LDV} = \frac{v_{LDV}}{\lambda}. \quad (27)$$

A luz espalhada pela partícula é recebida pelo fotodetector e o desvio na frequência é estimado através da análise espectral do sinal recebido. Essa modificação na frequência devido ao movimento relativo da fonte é denominada de efeito Doppler, em homenagem a Christian Doppler que foi o primeiro a observar esse fenômeno.

A velocidade do fluido é igual à da partícula somente se ela seguir exatamente a velocidade do escoamento. Para isso, o tamanho da partícula precisa ser muito pequeno, da ordem de micrômetros. Outra condição é que o índice de reflexão entre fluido e partícula seja suficientemente alto para provocar espalhamento significativo da luz.

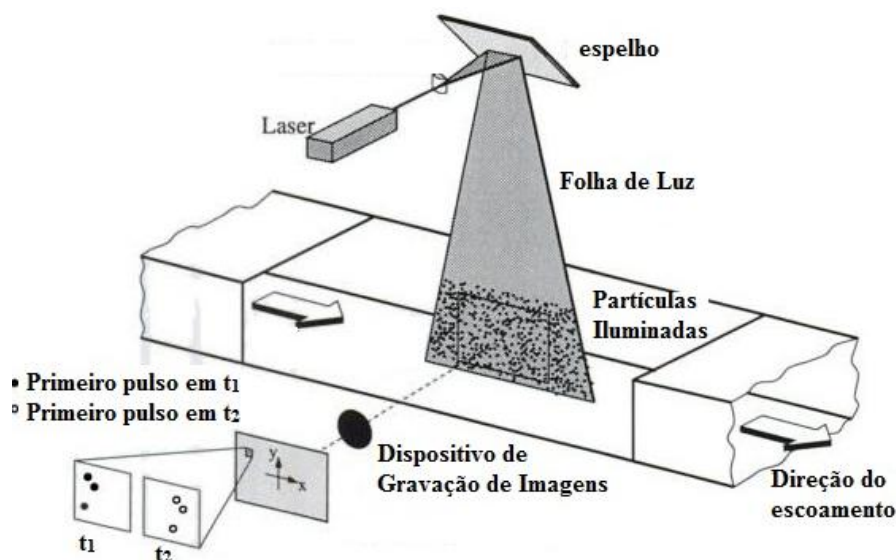
Como cada partícula que cruza o volume de medição gera seu próprio desvio Doppler na frequência, é realizada uma grande quantidade de medidas individuais que irão compor uma função distribuição de probabilidade no qual a velocidade estimada será a velocidade média dessa distribuição.

Seu diferencial em relação às técnicas anteriores está em não interferir no escoamento, pois o transdutor fica localizado externamente ao duto. Além disso, apresenta excelente resolução espacial, tipicamente o volume de interceptação dos feixes é de  $0,1 \text{ mm}^3$ . Também permite a medição de uma faixa muito grande de velocidades: desde  $0,1$  a  $100 \text{ m/s}$ .

Por outro lado, é restrita a tubulações ou líquidos opticamente transparentes. Uma descrição mais aprofundada sobre o tema pode ser encontrada em Adrian (1996), Czarke (2006), Hammer et al. (2006) e Johnson (2000).

A utilização de câmeras com taxa de captura de quadros na ordem de quilohertz permite a visualização da evolução do movimento das fases num escoamento multifásico de uma seção de área da tubulação. Para isso é preciso ter pelo menos mais de uma fase na tubulação ou então algum tipo de marcador ou partícula que se possa observar o movimento. Em escoamentos bifásicos ar-água, as bolhas pequenas são utilizadas para estimar de forma aproximada a velocidade do líquido e as maiores para a velocidade do gás. Para realizar a medição são empregados algoritmos de processamento de imagens. Sua desvantagem está em somente conseguir visualizar o que está nas imediações das paredes do tubo, o líquido e gás precisam ser opticamente transparentes além de exigir um grande esforço computacional para o processamento das imagens. Vários trabalhos que foram feitos nesta área são reportados em Zaruba et al. (2005).

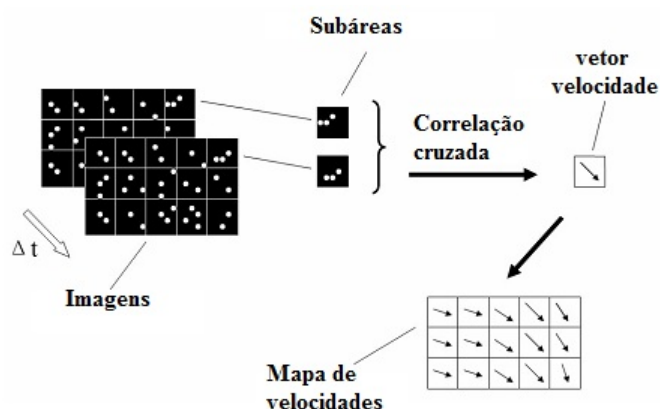
Da filmagem em alta velocidade chegou-se à metodologia conhecida como PIV (*Particle Image Velocimetry*), que se baseia em obter os deslocamentos das partículas de uma sequência de fotos adquiridas de certa área do escoamento. Descobrimo-se o deslocamento e tempo entre cada aquisição de imagem chega-se na velocidade. Para iluminar as partículas microscópicas de forma que elas apareçam nas imagens capturadas é preciso uma fonte de alta intensidade luminosa, e por isso é empregado uma fonte de luz laser.



**Figura 15** – Arranjo experimental de um sistema PIV aplicado a um túnel de vento.  
 Fonte: Adaptado de Raffel, Willert e Kompenhans (1998).

Na Figura 15 é mostrada uma configuração típica da técnica PIV. Um plano do escoamento é iluminado por uma luz laser colimada para ficar no formato de uma folha de luz. O laser é pulsado duas vezes, ou duas fontes de laser são pulsadas em tempos diferentes. Entre cada iluminação ocorre movimento das partículas e a luz espalhada por elas é gravada por uma câmera CCD. Para a determinação da velocidade as imagens são divididas em subáreas, de acordo com a Figura 16. Os vetores de deslocamentos locais das partículas para o primeiro e segundo pulso é determinado para cada subárea através de métodos estatísticos como a correlação cruzada. Os vetores velocidades são calculados levando-se em conta o tempo transcorrido entre uma iluminação e outra.

Quando a concentração de partículas inseridas é baixa, é possível rastrear o movimento de cada partícula e essa variação é geralmente denominada de *Particle Tracking Velocimetry*, ou PTV.



**Figura 16 – Esquema das etapas de processamento de imagens aplicadas à técnica de PIV.**  
**Fonte: Adaptado de Liu et al. (2006).**

O uso do PIV é especialmente interessante para o estudo do campo de velocidades, obtendo informações acuradas sobre a variação vetorial desse campo. Como toda técnica óptica ela possui a desvantagem de necessitar visualização direta do escoamento. Seu custo é bem elevado, não somente os equipamentos: Laser e câmeras, mas também as partículas usadas que precisam ser da ordem de micrômetros e com alto coeficiente de reflexão óptica. Um histórico detalhado e uma revisão do estado da arte desta técnica são encontrados em Adrian (2005) e Raffel, Willert e Kompenhans (1998).

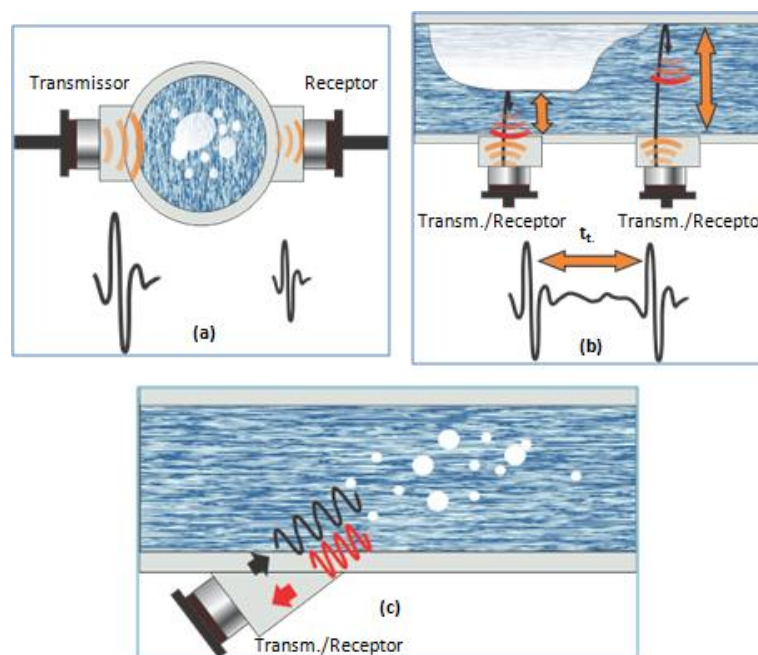
Seguindo uma mesma linha de raciocínio desenvolveu-se o rastreamento de partículas por emissão de pósitrons. Consiste em se rastrear uma partícula radioativa através

da distribuição de raios gama emitidos. Além de ser uma técnica não intrusiva, permite também ser utilizada em meios opticamente opacos. Também conhecida como PEPT (*Positron Emission Particle Tracking*), ela utiliza pósitrons emitindo radioisótopos que possuem a propriedade de emitir um par de raios gamas no seu decaimento, que podem ter sua localização detectada por triangulação. As partículas empregadas como marcadores são da ordem de 1 mm. Esta técnica permite rastrear a partícula em 3 dimensões a 1 m/s de velocidade com erro de 10% através da utilização de uma câmera de pósitrons com 250 quadro/s. A dificuldade em utilizá-la está em ser uma técnica nuclear, que necessita de segurança e procedimentos especiais de manuseio e instalação. Todos estes cuidados acabam gerando um acréscimo significativo no custo de uma solução baseada neste princípio. Uma explicação minuciosa da técnica pode ser encontrada em Stein et al. (1997).

Existe ainda outras técnicas tomográficas que através de abordagens de processamento de sinais semelhantes a aplicada no PIV (Figura 16), obtêm a distribuição da velocidade numa área da seção do escoamento empregando um tomógrafo entre dois pontos relativamente próximos do escoamento. Para obter a imagem, vários princípios físicos podem ser empregados como: impedância; ressonância magnética, capacitivo, resistivo, raios X, etc. Em Da Silva (2008) é feito uma revisão de cada uma das técnicas mais estudadas.

As técnicas baseadas em ultrassom aproveitam o efeito que as fases em movimento provocam na propagação de ondas ultrassônicas e podem ser englobadas em 3 abordagens típicas conforme mostra a Figura 17.





**Figura 17 – Três abordagens típicas de aplicação da técnica ultrassônica. Em (a) a técnica de atenuação, (b) tempo de trânsito e (c) modo Doppler pulsado.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A utilização de um transdutor dedicado a enviar ondas e outro a receber compõe o modo mais simples de implementação da técnica de atenuação (Figura 17-a). Baseia-se em comparar o sinal recebido com o sinal transmitido, para verificar a alteração do tempo de trânsito e amplitude da onda ao atravessar o meio. Um único transdutor pode funcionar como receptor depois que termina de realizar uma emissão. Nesse caso, ele espera receber algum eco da sua própria transmissão, e por isso, é dito que ele trabalha no modo pulso-eco. Tal modo permite a configuração típica mostrada na Figura 17-b. Medindo-se o tempo de trânsito do eco,  $t_t$ , é possível determinar a posição da interface líquido-gás, se a velocidade do som no líquido for conhecida. O parâmetro temporal medido deu o nome pelo qual ficou conhecida essa abordagem.

A técnica ultrassônica de Doppler pulsado (Figura 17-c) se assemelha a LDV, utilizando o mesmo princípio de que a frequência da onda emitida sobre um objeto em movimento retorna para o sensor com sua frequência original modificada. Sendo esse desvio na frequência diretamente relacionado à velocidade do objeto. Assim como na LDV, para medir a velocidade de líquidos é necessária a inserção de partículas que fiquem suspensas no fluido. As bolhas pequenas também funcionam como partículas para o ultrassom tornando-o muito interessante para análise de velocidade de bolhas em escoamentos borbulhantes.

Sendo o ultrassom uma onda mecânica ele se propaga com relativa facilidade em sólidos e líquidos. Portanto, o transdutor ultrassônico pode ser aplicado externamente à tubulação, objeto da medição, sem necessidade de intervenção direta na mesma. Dessa forma, diferente do que acontece nas técnicas baseadas em impedância, essa técnica é considerada não invasiva e não intrusiva. Ademais, não possui a limitação das metodologias ópticas podendo ser aplicada a fluidos opacos como óleos pesados, metais líquidos, escoamentos de alimentos, combustíveis e diversas outras soluções químicas. Quanto ao custo, o mesmo é considerado baixo, tanto de implantação e aquisição, se comparado a técnicas nucleares ou de ressonância magnética. Sua resolução espacial depende da frequência escolhida do transdutor e dos números de ciclos emitido, atingindo valores de até 0,74 milímetros, estando na mesma ordem de grandeza de técnicas como a LDV. A resolução temporal depende da profundidade e da capacidade de processamento do equipamento de medição, para uma tubulação de 1 polegada de diâmetro pode-se chegar a resoluções da ordem de 0,1 milissegundos, igualando-se as resoluções atingidas pela malha de eletrodos. Sua única limitação é ficar restrito a escoamentos com frações de vazio abaixo de 20% porque sua onda é refletida quase que integralmente por qualquer fase gasosa, e a partir dessa condição o feixe da onda praticamente não consegue penetrar no interior da tubulação devido às múltiplas reflexões. (BRÖRING et al., 1991). Contudo cabe ressaltar que, para algumas indústrias, os escoamentos de maior ocorrência estão abaixo desse limite, com exceção dos escoamentos intermitentes como o golfadas que tem fração de vazio média em torno de 40%. Entretanto, nesse caso, a técnica ultrassônica Doppler ainda pode ser utilizada devido a presença do pistão do líquido, ou seja, a limitação dela está somente nos casos onde a fase gasosa está mais presente que a líquida em todos os momentos do escoamento.

Outra propriedade que justifica a pesquisa para essa metodologia está em ser considerada uma medição livre de calibração, ou seja, não é preciso realizar qualquer tipo de procedimento pré-medição para garantir um nível de exatidão das medidas de velocidade. Assim ela pode ser generalizada facilmente para aplicações em qualquer líquido independentemente da sua viscosidade. O único parâmetro que precisa ser configurado no equipamento quando se muda de um fluido para outro é a velocidade do som do meio.

Mais recentemente mostrou-se que a utilização do Doppler pulsado por ultrassom não está restrita somente a medição de velocidade, mas também pode ser utilizada para detectar a posição da interface líquido-gás de maneira mais confiável que a técnica pulso-eco tradicional

(MURAI et al.; 2010). Detectando a interface ela também pode ser aplicada para mensurar a fração de vazio, além de, é claro, medir velocidade. Portanto, a tendência que cada vez mais se confirma é que a pesquisa e desenvolvimento de metodologias para instrumentação de escoamentos baseados em ultrassom convirjam para a técnica Doppler Pulsado.

## 2.4 REVISÃO DAS TÉCNICAS DOPPLER ULTRASSÔNICAS PARA ESCOAMENTOS

A aplicação da técnica Doppler na área médica começou na década de 60 (RUSHMER; BAKER; JOHNSON, 1967) quando se percebeu que as células vermelhas do sangue em movimento refletiam a onda emitida com uma frequência desviada da original. Os bons resultados obtidos impulsionaram o desenvolvimento de medidores de fluxo sanguíneo que, na década de 80, já estavam disponíveis comercialmente. O advento desses equipamentos propiciou o trabalho de Takeda (1986) que descreveu a primeira aplicação da técnica Doppler para escoamentos monofásicos. Para tanto ele inseriu partículas de Alumina na água que, suspensas no líquido, serviram como rastreadores do movimento, além de provocar a reflexão da onda de ultrassom. Desprovido de um equipamento comercial específico, ele faz uso de um medidor de fluxo sanguíneo e consegue obter o perfil espacial da velocidade para um tubo de 12 mm de diâmetro num escoamento em regime laminar (Figuras 18 e 19). O sucesso desses resultados preliminares motivou-o a desenvolver um equipamento Doppler especificamente voltado para a utilização em mecânica dos fluidos. O *Ultrasound Velocity Profiler*, ou UVP, como ficou mais conhecido, utiliza a técnica de estimação de velocidade baseada na variação que ocorre na fase do sinal Doppler pulsado de uma emissão para a outra (TAKEDA, 1990; TAKEDA, 1995). Os bons resultados obtidos com a utilização desse equipamento e a sua transformação em um equipamento comercial, disponibilizado pela empresa MET-FLOW S.A., facilitou sua aquisição por outros pesquisadores, dando início a uma nova linha de pesquisa dentro da área de escoamentos.

Os trabalhos iniciais nessa linha focaram-se em escoamentos monofásicos até que em Aritomi, Kikura e Suzuki (2000) iniciam-se estudos em escoamento envolvendo mais de uma fase. Nessa pesquisa, o UVP é utilizado em um escoamento borbulhante vertical com o

objetivo de medir velocidade do líquido e gás. Para medir a velocidade da água, foi aplicado partículas de nylon de 40  $\mu\text{m}$ . Nessa afluência surgiu uma dificuldade: como distinguir que ponto do perfil de velocidades está relacionado com que fase. Para contornar este problema foi utilizada a estratégia de escoar a água no sentido contrário ao das bolhas. Dessa forma o líquido aparece no perfil com um sinal de velocidade e as bolhas com o sinal contrário.

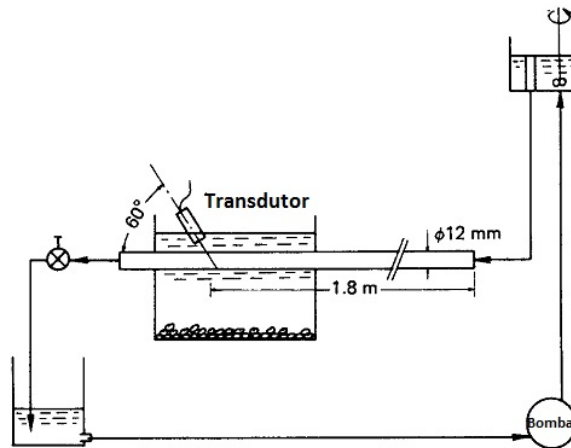


Figura 18 - Diagrama do experimento realizado por Takeda, 1986. O material utilizado como refletor foi Alumina (óxido de alumínio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) cujo diâmetro aproximado é de 5  $\mu\text{m}$ . O transdutor foi imerso na água para facilitar o acoplamento do transdutor com a tubulação. A vazão foi medida pesando a água que percorreu a tubulação.

Fonte: Adaptado de Takeda (1986).

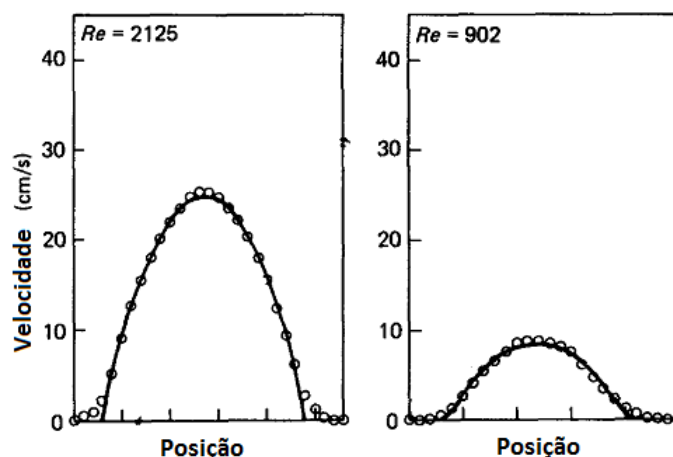


Figura 19 – Perfil de velocidade para dois diferentes valores de número de Reynolds. Os perfis obtidos correspondem a um número de Reynolds de 1747 e 728 correspondendo um erro médio de 18%.

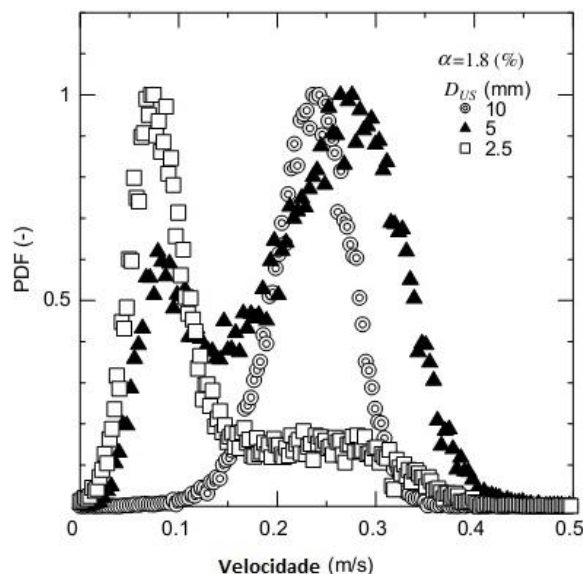
Fonte: Adaptado de Takeda (1986).

Essa restrição de que as fases fluam em sentido contrário limita, em muito, a aplicação da técnica Doppler ultrassônica pulsada para escoamentos. Em vista disso, deu-se início a um grande esforço de pesquisa no sentido de identificar e separar as velocidades de cada fase.

Uma das primeiras abordagens foi a de Suzuki et al. (2002), que utiliza métodos estatísticos para separar as diferentes velocidades entre líquido e gás numa tubulação vertical, entretanto ainda utilizando um escoamento com sentidos oposto do gás e líquido.

Um grande avanço veio através de Murakawa, Kikura e Aritomi (2005). Eles observaram o efeito que o volume de medição tem sobre o perfil de velocidade, como mostra o gráfico da Figura 20. Os dados da figura em questão são de um escoamento vertical gás-líquido, fases no mesmo sentido, borbulhante, onde as bolhas estão num patamar superior de velocidade em relação ao líquido. Diversos perfis de velocidade foram obtidos para obter uma função de distribuição de probabilidades (PDF). Analisando o gráfico da Figura 20, o transdutor de diâmetro menor de, 2,5 mm, é muito mais sensível à velocidade do líquido, já para o diâmetro maior, 10 mm, somente a velocidade da bolha é percebida.

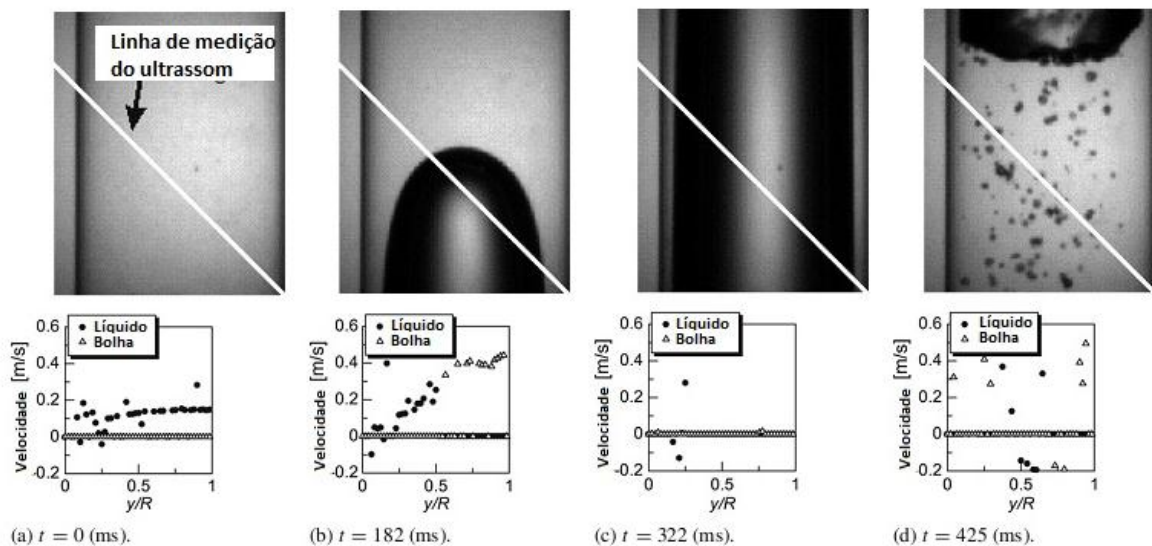
Assim para medição simultânea de perfis de velocidades foi proposto a utilização de um transdutor com dois piezelétricos: um de diâmetro menor (3 mm), frequência 8 MHz, e outro disposto em volta do primeiro em forma anelar com 10 mm de diâmetro e com frequência central de 2 MHz. Dessa forma, o menor é empregado para a medição do perfil de velocidade do líquido e o maior para a velocidade das bolhas.



**Figura 20 – PDF da velocidade para transdutores de diferentes diâmetros ativos.**  
**Fonte: Adaptado de Murakawa, Kikura e Aritomi (2005).**

Outro resultado interessante quanto à utilização do transdutor de menor diâmetro, está na obtenção do perfil de velocidade próximo a parede do tubo com maior exatidão, algo que não ocorre nos transdutores de maiores diâmetros.

Entretanto, a adição de um segundo transdutor não ocorre sem acréscimo na complexidade na técnica de medição. Uma das dificuldades é sincronizar a emissão e aquisição dos dois transdutores. Essa dificuldade foi superada mais tarde e publicada em Murakawa, Kikura e Aritomi (2008). Com o sincronismo, foi possível subtrair os sinais de eco da bolha que apareciam no transdutor utilizado para velocidade de líquido do sinal do transdutor de baixa frequência e maior diâmetro empregado para bolhas. Dessa maneira foi possível ter dois sinais separados representando a velocidade para cada fase. Com isso foi estendido o trabalho anterior para análise do perfil de velocidade espacial do líquido e gás para o escoamento de golfadas vertical e comparado com filmagem de alta velocidade sincronizada com o ultrassom, como mostrado na Figura 21.



**Figura 21 – Filmagem e perfil de velocidades obtidas por um transdutor duplo anelar.**  
**Fonte: Adaptado de Murakawa, Kikura e Aritomi (2008).**

Contudo, essa configuração de transdutor duplo anelar não é comum de ser encontrada nos fabricantes de transdutores o que limita a gama de modelos que podem ser adquiridos, desvantagem que pesa para que a aplicação desta técnica seja mais difundida. A sua complexidade de sincronização também a torna menos atraente em relação a utilização de um único transdutor.

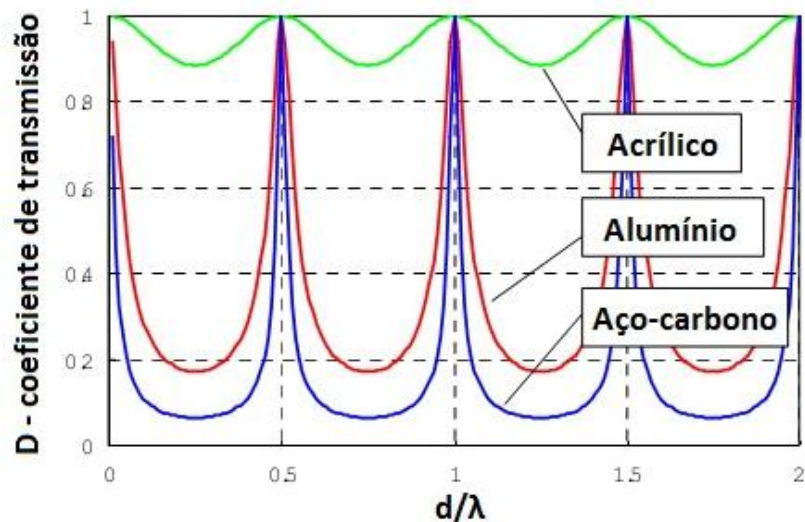
A dificuldade imposta pelo problema de se separar as velocidades de cada fase trouxe a tona a questão principal que envolve esse problema: identificar a posição da interface entre líquido e gás. Uma vez detectada a posição da fronteira entre as fases, a tarefa de separar os pontos do perfil de velocidade medido torna-se trivial. Essa questão ficou ainda mais atraente quando se mostrou que é possível romper a limitação que a técnica ultrassônica tem de não conseguir medir frações de vazio maiores de 20%. Através do uso de um modelo matemático que supõe uma distribuição gaussiana das bolhas ao longo da seção do tubo é possível reconstruir a fração de vazio de um escoamento borbulhante. Entretanto, a acurácia desta técnica está diretamente relacionada com a confiabilidade da detecção da posição da interface líquido-gás (MURAI et. al.; 2009).

Localizar a interface das fases torna-se mais complicado quando a aplicação alvo é seções tubulares metálicas. No trabalho de Takeda (1999), foi verificado que, quando a espessura da parede da tubulação,  $d$ , é comparável com o comprimento de onda,  $\lambda$ , que a onda ultrassônica apresenta, propagando-se na parede da tubulação, o índice de transmissão,  $T_m$ , da onda ultrassônica no metal é

$$T_m = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} \left( q_z - \frac{1}{q_z} \right)^2 \text{sen}^2 \left( \frac{2\pi d_t}{\lambda} \right)}}, \quad (28)$$

onde  $q_z = Z_1/Z_2$ , é o quociente das impedâncias acústicas do meio e da tubulação. O gráfico da equação (28) para uma tubulação de três tipos de materiais diferentes é apresentado na Figura 22. Analisando-o percebe-se que os pontos de máxima transmissão ocorrem quando (WADA et al., 2002)

$$\frac{d_t}{\lambda} = \frac{n_i}{2}, \quad \text{com } n_i = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (29)$$



**Figura 22 – Gráfico da equação (13) para tubulação de acrílico, alumínio e aço-carbono.**  
**Fonte: Adaptado de Wada et al. (2002).**

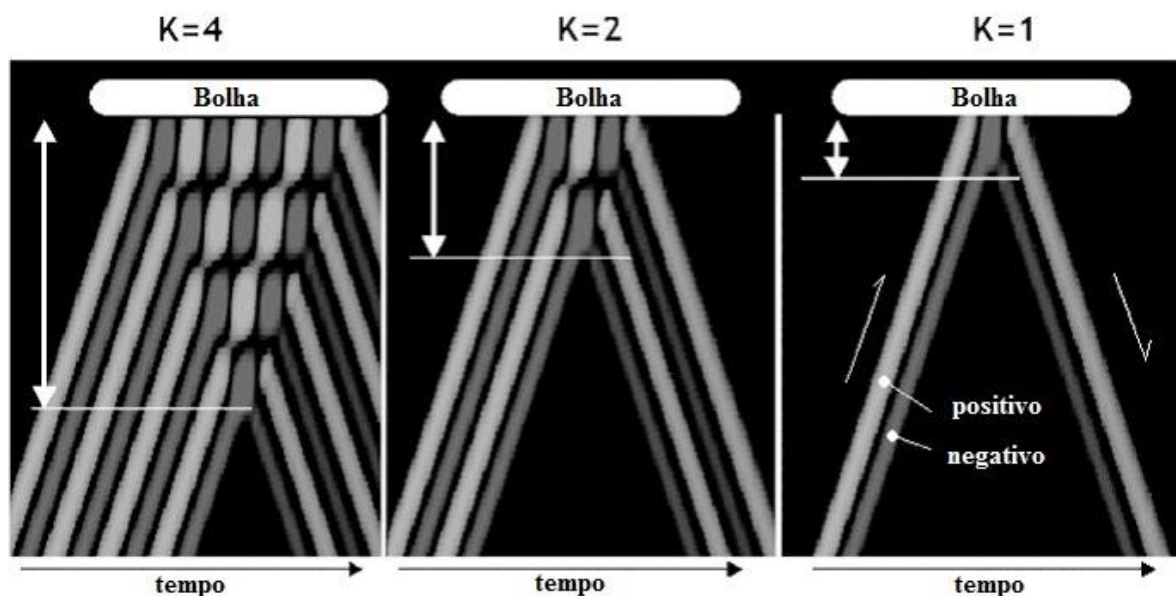
Observe que, o resultado da Figura 22, apresenta um vale pronunciado para materiais metálicos, e mesmo que se adeque a espessura da tubulação para aperfeiçoar a transmissão, ainda assim a atenuação do sinal será relevante porque qualquer pequeno erro na espessura resultará em grande perda de sinal. Por isso a utilização da técnica ultrassônica Doppler em tubulações metálicas implica em trabalhar com sinais de ultrassom ainda mais atenuados, ou seja, com relação sinal-ruído bastante baixa. O que torna esse tipo de aplicação ainda mais complexa para localização espacial das fases e reforça o estudo de técnicas confiáveis para realizar essa tarefa.

A forma mais simples de detectar a fronteira entre líquido e gás é analisando a amplitude do eco do sinal de ultrassom. Como a diferença de impedância acústica entre as fases é muito grande, ocorre um alto valor de pico na onda refletida pela interface água-ar e a detecção pode ser realizada pelo estabelecimento de um limiar. Denominada de técnica da intensidade do eco, a mesma enfrenta problemas em diferenciar o que é líquido do gás quando a fase líquida tem um coeficiente moderado de atenuação do som, ou quando tem-se impurezas presentes, como areia, ou as próprias partículas empregadas para rastrear o movimento do líquido, pois dessa forma a intensidade do eco do gás começa a se confundir com a das partículas presentes. Dificuldade similar ocorre quando a tubulação envolvida é de material metálico, que também provoca diminuição da amplitude dos ecos recebidos. Em Murai et al. (2010) mostrou-se que essa técnica possui mais uma limitação, quando o ângulo da interface e a onda de ultrassom é notável, o eco refletido não retorna para o transdutor.



Logo, ela só é indicada para casos onde o ângulo de inclinação entre a interface das fases e a onda ultrassônica é muito pequeno. Tal desvantagem motivou a necessidade de criar novos meios de detecção da interface gás-líquido que sejam aplicáveis a interfaces turbulentas que apresentam grande variação angular, que é o caso de muitos padrões de escoamento.

A primeira técnica proposta surgiu do trabalho de Murai et al. (2006) e mais tarde foi denominada de técnica Doppler local. Quando uma onda de ultrassom, propagando-se na água encontra uma interface de líquido-gás, plana, devido à enorme diferença de impedância acústica (a impedância do ar é muito menor que a da água), o índice de reflexão será negativo, portanto a onda refletida terá a fase invertida e interferirá com o restante da onda incidente formando uma onda estacionária. Na proximidade da interface existirão áreas onde a pressão acústica será zero ou próxima de zero, portanto as partículas presentes nessas áreas não irão refletir a onda de ultrassom de volta para o transdutor. Com isso a velocidade medida será zero. Esse fenômeno está mostrado na Figura 23. Para que esse efeito seja mensurável é preciso que o transdutor emita pelo menos 2 ciclos completos de ondas de pressão e que o tamanho da bolha relativo ao feixe de ultrassom possa ser considerado como uma superfície plana.



**Figura 23 – Reflexão da onda de ultrassom numa interface líquido-bolha. Para 4, 2 e 1 ciclo de onda emitida. As faixas brancas e cinzas indicam os picos positivo e negativo da pressão acústica.**

Fonte: Adaptado de Murai et al. (2009).

A profundidade dessa camada de velocidade nula é dada pela equação (MURAI et al., 2006)

$$\delta = \frac{1}{2} \lambda K \cos \emptyset \quad (30)$$

onde  $\lambda$ ,  $K$  e  $\emptyset$  são o comprimento de onda, o número de ciclos completos de um pulso do ultrassom e o ângulo de inclinação do feixe respectivamente. Essa profundidade é relativamente bem pequena e exige uma boa resolução espacial do equipamento de perfil de velocidades. Para se ter uma ideia, utilizando um transdutor de 4 MHz com um pulso de 4 ciclos essa profundidade é de 0,74 mm. Tal resolução espacial não é difícil de atingir, ainda mais utilizando um equipamento como o UVP.

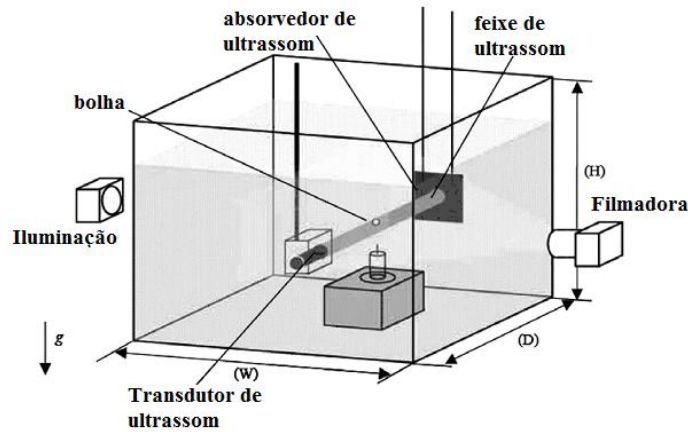
No entanto, é demonstrado que essa técnica sozinha só tem bom desempenho se a fase gasosa for carregada pelo escoamento. Em escoamentos mais complexos, como o borbulhante, por exemplo, é verificado que a técnica Doppler local precisa ser complementada pela técnica de intensidade de eco e, portanto, ambas devem ser utilizadas para se obter melhores resultados (MURAI et al., 2010).

A segunda técnica para detecção de interfaces, denominada de técnica de variância da velocidade, também foi descrita no artigo de Murai et al. (2010). Ela baseia-se em encontrar um limiar de velocidade, através de análises estatísticas propostas por Otsu (1979), que servirão para definir o limiar de velocidade que define a fronteira entre uma fase e a outra. Segundo o autor desta metodologia, a mesma é adequada à aplicação em escoamentos intermitentes, como o padrão em Golfadas, por exemplo.

O caso mais complexo de detecção da posição da interface está no escoamento com ascensão de bolhas em líquido estagnado. O movimento oscilante da bolhas causa deformações em seu formato, ocorrendo mudanças dinâmicas na inclinação da sua interface, o que prejudica a detecção da mesma por ultrassom. A dificuldade torna-se maior ainda quando tem-se bolhas com diâmetro de esfera equivalente da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda do ultrassom, o que implica numa reflexão heterogênea causando intermitência nos ecos recebidos. Dessa forma a aplicação da técnica de intensidade do eco irá falhar na maior parte dos casos. (MURAI, 2010).

Nos trabalhos de Wang et al. (2003), foi demonstrado que se o tamanho das bolhas e sua velocidade de esteira é conhecido, é possível detectar sua interface pela variação na velocidade medida ao seu redor. Dessa maneira foi estabelecido um método de detecção da interface das bolhas por Murai et al. (2010), utilizando o UVP, que obtêm a posição das mesmas pela variação que elas provocam no mapeamento espaço-temporal da velocidade.

Para verificar a acurácia da detecção ele realizou um experimento, Figura 24, confrontando os dados obtidos com os da filmagem em alta velocidade.



**Figura 24 – Configuração do experimento de ascensão de bolhas em líquido quiescente. Bolhas de 3,5 mm de diâmetro equivalente de esfera são geradas por uma seringa. Um transdutor de ultrassom de 8 MHz, 2,5mm diâmetro ativo, emite 4 pulsos de ultrassom a cada 4 ms, num plano perpendicular em que é feita a filmagem, numa taxa de 250 quadros por segundo e com resolução de 46  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ .**

Fonte: Adaptado de Murai et al. (2010).

Com objetivo de quantificar a confiabilidade da posição detectada, ele comparou a utilização de vários filtros espaciais, utilizando como critério o erro médio quadrático espaço-temporal da detecção dado pela equação:

$$E_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{\delta x}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta t}{\Delta t}\right)^2} \quad (31)$$

onde  $\delta x$  e  $\delta t$  são os erros no espaço e tempo, e  $\Delta x$  e  $\Delta t$  a resolução espacial e temporal respectivamente. Para o filtro de suavização espacial, que apresentou melhor resultado dentre os outros, obteve como resultado, um erro médio quadrático um pouco menor que 4 unidades e uma probabilidade de falha na detecção das bolhas entre 8 a 9%, analisando a passagem de 500 bolhas.

Esta Tese visa acrescentar ao estado da arte de detecção da posição de interface descrito até aqui por meio da utilização de um algoritmo de estimação de velocidade, VMS, que retorna uma curva espectral de velocidades. Através da análise dessa curva é que serão extraídos parâmetros que servirão para identificar a posição da fase.

### 3 SISTEMA PARA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE POR VMS

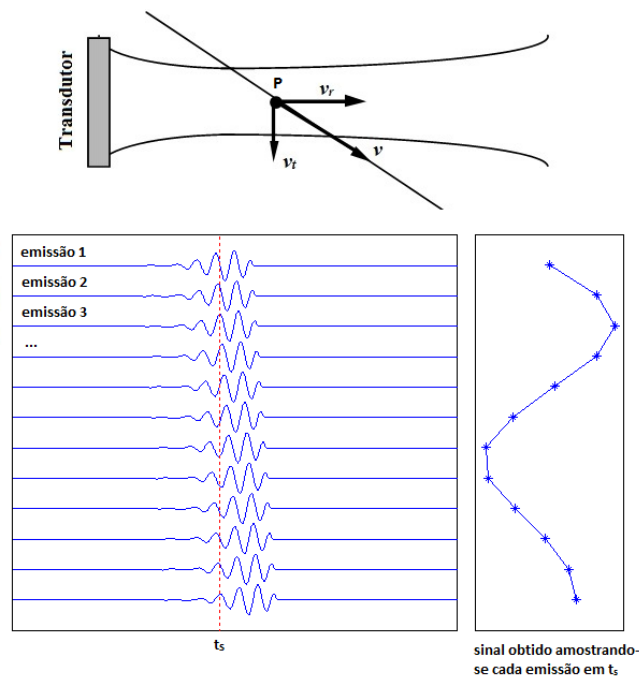
O conjunto de técnicas utilizadas para desenvolver um sistema de medição de perfil de velocidade com base no estimador VMS é descrito neste capítulo. Inicia-se com a descrição teórica do modelo matemático do sinal ultrassônico recebido após refletir nas partículas rastreadoras de movimento. O processo que filtra e reduz a banda do sinal adquirido, chamado de demodulação complexa, é explanado na subseção seguinte. Esse sinal demodulado será utilizado como entrada para medição da velocidade. Em seguida, a técnica de estimação de velocidade denominada de VMS (*Velocity Matched Spectrum*) será introduzida. Aspectos práticos importantes para a implementação da técnica, como janelamento e filtros de pré e pós-processamento, também são abordados. Por fim é descrito a composição de equipamentos utilizada para construção do sistema de medição.

#### 3.1 MODELO DE INTERAÇÃO DO ULTRASSOM COM AS PARTÍCULAS

Para a aplicação da técnica Doppler na medição da velocidade da fase líquida em escoamentos é necessário a inserção de partículas que fiquem suspensas no líquido. e dessa forma sirvam como rastreadores do movimento e por consequência da velocidade. Para que essas partículas causem o mínimo de interferência no escoamento, é preciso que elas tenham uma densidade muito próxima à do líquido além de apresentar um diâmetro médio na ordem de micrômetros. Isso implica em utilizar transdutores que possuam resolução axial na mesma ordem das partículas. Como foi revisada na seção anterior, a resolução axial depende da frequência central do transdutor e do número de ciclos que ele emite. Tipicamente utiliza-se transdutores com frequências acima de 1 MHz, e que emitam um pulso de 4 ciclos de duração. A pequena largura do pulso implica num espectro que apresenta uma larga banda de frequências. Considere o caso da aplicação de um transdutor de 3 MHz, com ângulo de 45° graus, para medir uma velocidade típica de 0,5 m/s de uma partícula na água ( $c=1540$  m/s). Utilizando-se a equação (108) da teoria clássica do efeito Doppler (Apêndice A) chega-se num desvio de frequência de 1,4 kHz. Detectar um variação de frequência dessa ordem num

signal de 3 MHz, com uma banda muito larga, é uma tarefa complexa. Além disso, durante a sua propagação, a onda de ultrassom sofre um processo de atenuação que pode mudar sua frequência, resultando em muitos casos, num desvio de frequência muito maior que o valor provocado pelo efeito Doppler, tornando a origem do desvio ambígua (JENSEN, 2008).

Entretanto, o desvio na frequência não é a única característica que um objeto refletor em movimento proporciona. É preciso considerar também que o tempo de trânsito do sinal de ultrassom vai aumentando (ou diminuindo) a cada emissão devido ao movimento de afastamento (ou de proximidade) do objeto em relação ao transdutor. Portanto se forem feitos sucessivas aquisições de emissões, utilizando um período de tempo fixo, denominado de  $T_{prf}$ , e suficientemente grande para que a onda atinja o objeto e volte, será observado o comportamento apresentado na Figura 25. Nela os gráficos de cada uma dessas emissões estão dispostos em linhas, observando que a onda se distancia do transdutor devido ao afastamento do elemento refletor.



**Figura 25 – Ecos de múltiplas emissões de ultrassom numa partícula em movimento.**  
**Fonte: Adaptado de Torp (2000).**

O sinal recebido na emissão 1 pode ser descrito por (JENSEN, 2008):

$$r_1(t) = ae(\alpha t - t_0), \quad (32)$$

onde  $a$  é fator que indica a “força” da reflexão da partícula em movimento. Será considerado que o meio onde a partícula se encontra não provoca atenuação e que ecos de uma mesma partícula apresentam valores  $a$  que não se altera de uma emissão para outra. A função  $e(t)$  modela o comportamento do sinal emitido. O efeito Doppler aumenta ou diminui a frequência da onda emitida devido ao movimento de aproximação ou afastamento em relação ao feixe, esse efeito também pode ser visto como uma compressão ou expansão no tempo, que na equação (32) é modelado pela variável  $\alpha$  que escalona o tempo  $t$ . Esse fator multiplicativo do tempo está relacionado com a componente radial da velocidade,  $v_r$ , que a partícula P, apresenta quando atravessa o feixe (Figura 25) através da relação (JENSEN, 2008):

$$\alpha = 1 - \frac{2v_r}{c}, \quad (33)$$

se a partícula P se aproxima do transdutor,  $v_r$  será negativa, acarretando em  $\alpha > 1$ , assim o tempo é expandido correspondendo a uma diminuição na frequência. Quando a partícula P se afasta do transdutor,  $v_r$  será positiva, implicando em  $0 < \alpha < 1$ , resultando numa compressão do tempo e, portanto a frequência do sinal é aumentada.

O atraso de tempo  $t_0$  da equação (32) é relativo ao início de cada emissão, e corresponde a uma profundidade,  $d_0$ , relacionada pela velocidade de propagação do som no meio, dada por

$$t_0 = \frac{2}{c} d_0. \quad (34)$$

A segunda emissão é realizada após transcorrer  $T_{prf}$  segundos, assim o sinal recebido será

$$r_2(t) = ae(\alpha t - t_0 - T_{prf}). \quad (35)$$

Pode-se relacionar a equação anterior com a equação (32) fazendo a seguinte transformação:

$$r_2(t) = ae \left[ \alpha \left( t - \frac{T_{prf}}{\alpha} \right) - t_0 \right],$$

$$r_2(t) = r_1 \left( t - \frac{T_{prf}}{\alpha} \right). \quad (36)$$

A equação anterior demonstra que, devido ao movimento da partícula, o sinal de cada emissão pode ser representado relativamente ao sinal da primeira emissão acrescido de um fator de atraso. Esse fator pode ser relacionado com a velocidade radial substituindo nele a expressão de  $\alpha$  dada pela equação (33):

$$\frac{T_{prf}}{\alpha} = \frac{T_{prf}}{1 - \frac{2v_r}{c}} \approx T_{prf} \left( 1 + \frac{2v_r}{c} \right) = T_{prf} + t_s, \quad (37)$$

sendo  $t_s$  dado por

$$t_s = \frac{2v_r}{c} T_{prf}. \quad (38)$$

Assim, a equação (36) pode ser escrita usando o resultado da equação (37) como

$$r_2(t) = r_1(t - T_{prf} - t_s). \quad (39)$$

Transladando o sinal  $r_2(t)$  para que ele se inicie em  $T_{prf}$  segundos, ou seja, o sinal de cada emissão será considerado a cada  $T_{prf}$ , temos que

$$r_2(t) = r_1(t - t_s), \quad (40)$$

sendo que o resultado obtido pode ser recursivamente estendido para as emissões posteriores, desde que apresentem ecos relativos a mesma partícula. Assim, para a  $i$ -ésima emissão o sinal recebido será:

$$r_i(t) = r_1(t - (i - 1)t_s). \quad (41)$$

Com o resultado da equação (40) e (41) demonstra-se que os atrasos de tempo sofridos pelos ecos a cada emissão estão relacionados com a componente de velocidade radial. Substituindo a equação (32) na (41),

$$r_i(t) = ae(\alpha t - (i - 1)t_s - t_0). \quad (42)$$

O comportamento do sinal emitido,  $e(t)$ , pode ser modelado como (JENSEN, 2008)

$$e(t) = g(t)\text{sen}(2\pi f_c t). \quad (43)$$

onde  $f_c$  é a frequência da onda incidente emitida pelo transdutor e  $g(t)$  é

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < \frac{n_c}{f_c}, \\ 0, & \text{do contrário} \end{cases} \quad (44)$$

onde  $n_c$  é o número de ciclos que o transdutor emite em cada pulso. A função  $g(t)$  irá definir a envoltória do sinal e, apesar de existirem funções de envoltória que se aproximem melhor do comportamento real, foi utilizado um modelo simples porque ela não irá afetar o resultado final de interesse. Substituindo o modelo do sinal da equação (43) na equação(42), chega-se em

$$r_i(t) = ag_i(t)\text{sen}(2\pi f_c[\alpha t - (i - 1)t_s - t_0]), \quad (45)$$

sendo  $g_i(t)$  dado por:

$$g_i(t) = g(\alpha t - (i - 1)t_s - t_0). \quad (46)$$

Por fim, o sinal de alta frequência de cada emissão é amostrado utilizando um período de amostragem  $T_s$  e, portanto, a variável  $t$  se tornará discreta:

$$t = nT_s = \frac{n}{f_s}, \quad (47)$$



onde  $f_s$  é a frequência de amostragem. Ela precisa ser pelo menos duas vezes maior que a frequência de emissão do transdutor,  $f_c$ , somada com a metade da sua banda de passagem, segundo critério de Nyquist. Dessa forma, o modelo das repetidas emissões, representado pela equação (45), amostrado pelo critério da equação (47) será representado pela sequência discreta:

$$r_i(nT_s) = ag_i(nT_s)\text{sen}(2\pi f_c[\alpha nT_s - (i-1)t_s - t_0]). \quad (48)$$

Para obter o sinal, que é composto de uma amostra por linha (Figura 25), a variável que muda na equação (48) será o índice  $i$  de cada emissão, então todo termo que não é multiplicado por  $i$  pode ser considerado constante e englobado num termo de defasagem,  $\phi_s$ , assim e substituindo o valor de  $t_s$  pela relação da equação (38) na equação (48):

$$r_i(nT_s) = -ag_i(nT_s)\text{sen}\left(2\pi\frac{2v_r}{c}f_c(i-1)T_{prf} + \phi_s\right), \quad (49)$$

onde

$$\phi_s = -2\pi f_c \left[ \left(1 - \frac{2v_r}{c}\right) nT_s - t_0 \right].^1 \quad (50)$$

O termo  $(i-1)T_{prf}$  corresponde ao tempo, ou seja, é como se  $r_i$  linhas fossem amostradas com período igual a  $T_{prf}$ . O resultado obtido nas equações (49) e (50) mostram que o sinal resultante da amostragem terá uma frequência e fase que são determinadas pela velocidade radial do elemento refletor.

Segundo Alam e Parker (2003) os métodos de estimação de velocidade podem ser englobados em três grupos: os que estimam a velocidade medindo a frequência/fase do sinal amostrado através de técnicas espectrais; os que obtêm a velocidade estimando o atraso de

---

<sup>1</sup> O fator  $2v_r f_c / c$  das equações (49) e (50) é igual ao da equação (110) (Apêndice A) o que leva a interpretação errônea de que o resultado dessas equações seja devido ao efeito Doppler clássico.

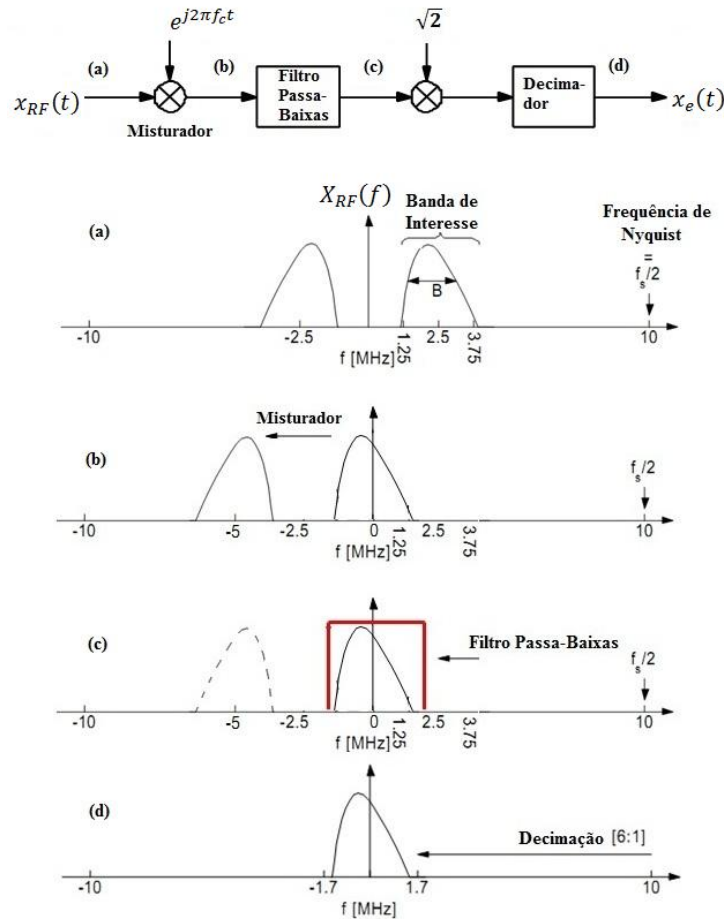
tempo entre as sucessivas emissões e os que utilizam tanto a mudança de fase e atraso de tempo para obter a velocidade.

Os estudos das técnicas baseadas em estimação de frequência/fase convergiram para uma metodologia que obtêm a velocidade pela fase da função de autocorrelação entre emissões. Tal avanço permitiu uma implementação muito eficiente do ponto de vista computacional. Entretanto fica limitada a uma frequência de emissões muito alta para evitar o efeito de *aliasing*. Medir a velocidade através do atraso de tempo entre as emissões não sofre com a restrição de *aliasing*. Através de técnicas estatísticas de correlação cruzada entre linhas de emissão a velocidade é estimada. Contudo, como essa metodologia não utiliza normalização da energia entre uma emissão e outra, duas emissões que apresentam valores de amplitude discrepantes, mas correlacionadas, irão resultar numa estimativa de velocidade que estará incorreta (SCHLAIKJER, 2001). Além disso, o cálculo da correlação cruzada exige uma grande carga computacional. A classe de técnicas baseadas na medição do desvio de fase e atraso de tempo não sofrem com *aliasing* ou com problemas de correlação, mas apresentam carga computacional alta. Entretanto geram novas informações sobre a velocidade. O algoritmo VMS é uma implementação dessa classe de estimadores. Os métodos convencionais limitam-se a fornecer a velocidade média, enquanto que no VMS uma função de distribuição de velocidade é retornada.

### 3.2 DEMODULAÇÃO COMPLEXA

Aplicar a metodologia explicada na seção 3.1, envolve adquirir e armazenar várias emissões de sinais tipicamente amostrados a 40 milhões de amostras por segundo, o que resulta em enormes conjuntos de dados. Este problema é resolvido comprimindo os dados através de um método denominado de demodulação complexa ou demodulação em quadratura, que é muito empregado nos equipamentos de ultrassom modernos, como os utilizados na área médica. Além de diminuir a quantidade de dados para processamento, a demodulação complexa também reduz a banda de frequência que compõe o sinal, por isso utiliza-se a denominação de estimadores de banda estreita para os algoritmos que calculam a velocidade através dos dados demodulados em quadratura.

Seja um sinal de ultrassom pulsado, de frequência de 2,5 MHz, amostrado numa frequência de 20 MHz (tipicamente utiliza-se uma relação de frequência de amostragem maior ou igual a 8 vezes a frequência central do transdutor para a amostragem de sinais de ultrassom), com espectro de frequências dado pela Figura 27-a.



**Figura 26 – Diagrama e gráficos que compõem a demodulação complexa. (a) Espectro do sinal  $x_{RF}(t)$  após amostragem. (b) Espectro do sinal de entrada após multiplicação por exponencial complexa negativa com frequência igual ao da frequência central do transdutor. (c) Espectro do sinal após passagem pelo filtro passa-baixas. (d) Espectro do sinal após decimação. (para simplificar, foi omitida a repetição do espectro nas frequências múltiplas à frequência de amostragem – 3,33 MHz).**

Fonte: Adaptado de Kirkhorn (1999).

Como o sinal amostrado é real, o espectro de frequências apresentado na Figura 26-a será simétrico (OPPENHEIM et al., 1999), portanto a banda de frequência menores que zero é redundante. Assim para caracterizar o sinal basta a informação contida na banda de interesse, B, mostrada na Figura 26-a.

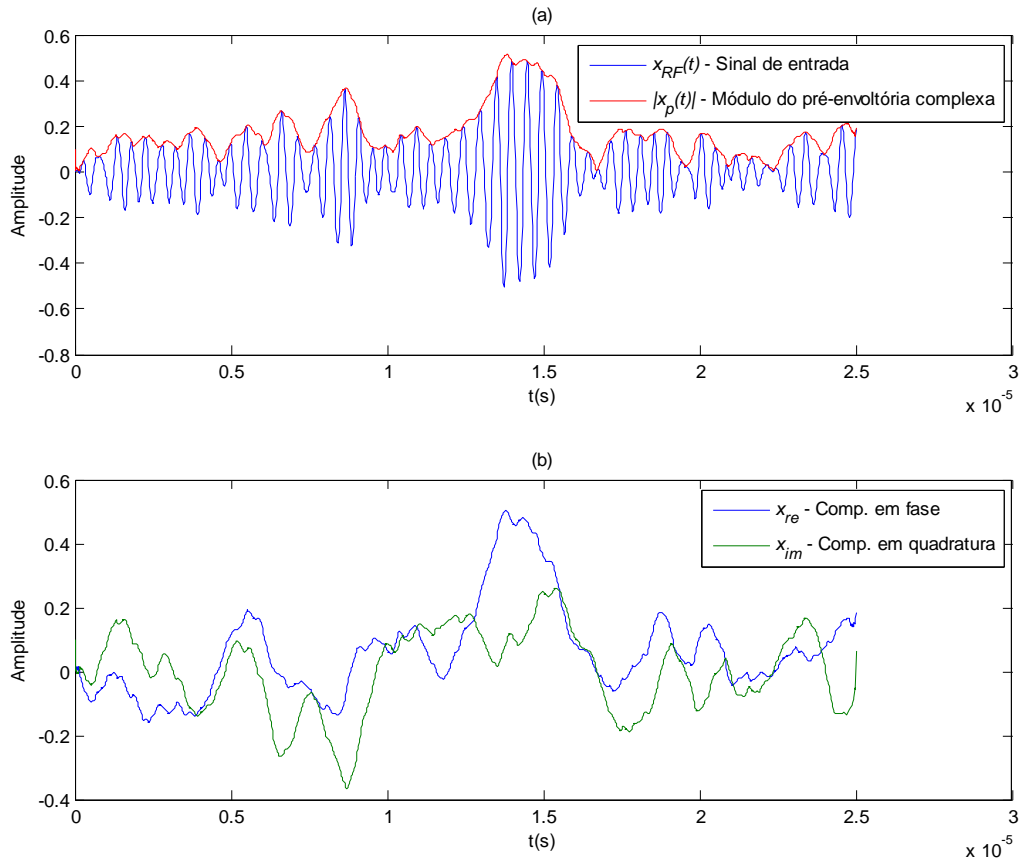
Para extrair essa informação é realizado o procedimento de demodulação complexa que tem seu diagrama genérico ilustrado na Figura 26. Na primeira etapa o sinal amostrado do

transdutor,  $x_{RF}(t)$ , com o espectro mostrado na Figura 26-a, é multiplicado por uma exponencial complexa negativa com frequência igual à frequência central do transdutor (2,5 MHz). Esse bloco é denominado de misturador ou *down-mixing*. A multiplicação do sinal  $x_{RF}(t)$  por uma exponencial complexa de frequência  $f_c$  equivale a realizar uma translação no espectro  $X_{RF}(f)$  em  $-f_c$  Hz, o que centraliza a banda  $B$  em torno da origem como mostrado na Figura 26-b. É importante observar que agora o espectro não possui simetria e por consequência o sinal amostrado pode ser visto como uma sequência de números complexos.

A próxima etapa consiste em passar o sinal transladado na frequência por um filtro passa-baixas para eliminar a banda lateral esquerda redundante, Figura 26-c, esse filtro deve ter frequência de corte suficientemente alta para que ele envolva toda a banda de passagem do sinal  $X_{RF}(f)$ . A eliminação da banda lateral esquerda diminui a energia do sinal original, para compensar isso o mesmo é multiplicado pela constante  $\sqrt{2}$ .

O sinal depois do filtro, agora possui máxima frequência menor que 1,7 MHz, então pelo teorema de Nyquist, pode ser amostrado com uma frequência seis vezes menor que a anterior (20 MHz), o bloco que realiza esta tarefa é denominado decimador e na prática o que ele faz é manter uma amostra a cada 6 lidas, Figura 26-d. O sinal resultante ocupa seis vezes menos espaço (para o exemplo da Figura 26).

A saída desse processo será o sinal  $x_p(t) = x_e(t)e^{j2\pi f_c t} = x_{re} + jx_{im}$ , onde a parte real,  $x_{re}$ , é denominada de componente em fase, a parte imaginária,  $x_{im}$ , é referida como componente em quadratura, e o termo  $x_p(t)$  é denominado de pré-envoltória complexa e  $x_e(t)$  é a envoltória complexa. A maior parte dos métodos de estimação de velocidade utiliza a pré-envoltória complexa ou a envoltória complexa como entrada dos algoritmos de processamento de dados de ultrassom. A Figura 27-a mostra a relação entre o sinal de entrada,  $x_{RF}(t)$  e o módulo da envoltória complexa. Na Figura 27-b é mostrado as componentes real e imaginária da pré-envoltória complexa,  $x_p(t)$ , correspondente ao sinal  $x_{RF}(t)$  da Figura 27-a.



**Figura 27 – Exemplo de sinal de saída após a demodulação complexa. Em (a) o sinal proveniente do transdutor de ultrassom,  $x_{RF}(t)$ , e o correspondente módulo da pré-envoltória complexa são mostrados. No gráfico em (b) tem-se a variação temporal da componente real e imaginária da pré-envoltória complexa obtidos para o mesmo sinal,  $x_{RF}(t)$ .**

**Fonte: Autoria própria.**

Desde que não ocorra *aliasing* no espectro amostrado de  $x_p(t)$  essa compressão do sinal é reversível, assim nenhuma informação é perdida nesse procedimento. Maiores detalhes podem ser obtidos em Kirkhorn (1999).

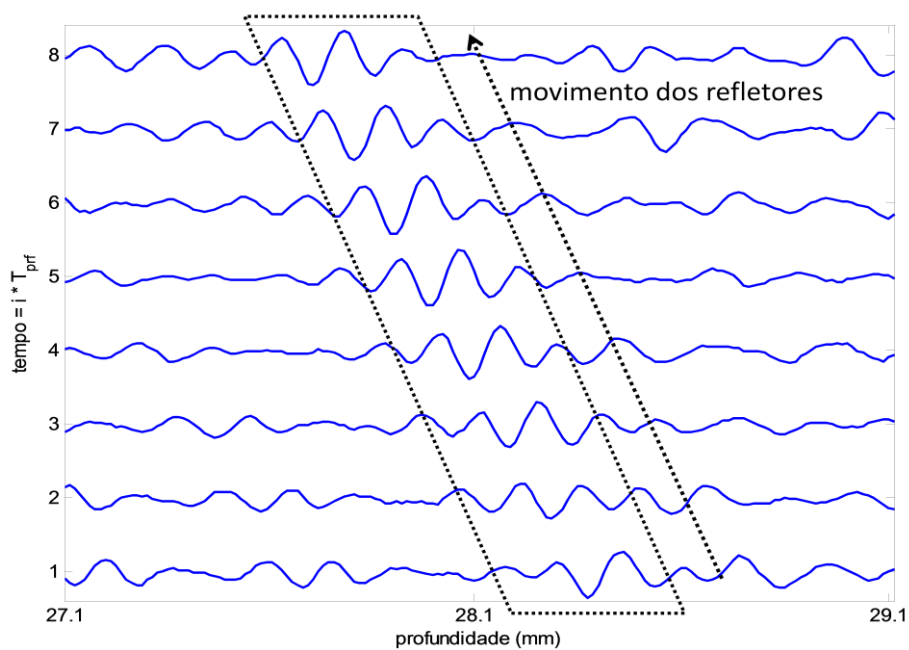
### 3.3 ESTIMAÇÃO DO ESPECTRO DA VELOCIDADE

As técnicas de estimação de velocidade que utilizam o deslocamento de tempo e a mudança de fase entre emissões diferenciam-se das demais por utilizar mais de uma amostra espacial de cada emissão. Nesse paradigma, os sinais recebidos das múltiplas emissões são

tratados como uma matriz de duas dimensões como mostra a Figura 28. O eixo vertical está associado às múltiplas emissões de pulsos ultrassônicos, dado pela  $k$ -ésima emissão vezes o intervalo entre cada emissão,  $T_{prf}$ . O eixo horizontal está relacionado ao tempo de trânsito,  $t$ , que o pulso de ultrassom leva para percorrer a distância total da linha de medição. A profundidade,  $P$ , está relacionado com o tempo de trânsito,  $t$ , através de

$$P = \frac{ct}{2}. \quad (51)$$

onde o eixo do tempo de trânsito também é referenciado como eixo de alta frequência, pois a frequência de amostragem está na faixa dos megahertz. Já o eixo das emissões é referenciado como de baixa frequência, pois a sua frequência de amostragem está na ordem de quilohertz. Devido ao movimento relativo das partículas em relação ao transdutor, pode-se observar deslocamento no tempo dos ecos na Figura 28 está correlacionado com a velocidade de acordo com a seção 3.1.



**Figura 28 – Representação dos dados de múltiplas emissões recebidas em duas dimensões**  
**Fonte: Adaptado de Wilson (1991).**

No modelo simplificado da seção 3.1 foi considerado a existência de somente um objeto refletor. Na prática temos a inserção de uma grande quantidade de partículas no

escoamento, e, portanto o sinal ultrassônico adquirido é composto pela superposição de múltiplas reflexões provenientes de um grande número de elementos, como mostra a Figura 28. O sinal de cada emissão da Figura 28 pode-se ser modelado como um processo estocástico estacionário se for considerando que as propriedades do sinal não mudam a não ser pelo atraso de tempo de uma emissão a outra. Assim o sinal recebido será tratado como um processo Gaussiano complexo (TORP, 2000). Tal processo é completamente caracterizado pela sua função de autocorrelação ou densidade espectral de energia definida como (TORP, 1995):

$$R_x(\tau, m) = E[x_p(t, k)^* x_p(t + \tau, k + m)], \quad (52)$$

$$G_x(w_1, w_2) = \int \int R_x(\tau, m) e^{-iw_1\tau} e^{-iw_2mT_{prf}} d\tau dm, \quad (53)$$

onde o símbolo \* indica o operador de complexo conjugado,  $x_p(t, k)$  é a pré-envoltória complexa do sinal recebido. Sendo a variável  $x_p$  contínua em  $t$  e considerada processo estacionário no tempo. A função  $G_x$  é somente a densidade espectral de energia sem considerar as réplicas (*nonaliased*) no eixo vertical devido a amostragem a cada  $T_{prf}$ . A autocorrelação pode ser decomposta pela função de espalhamento de ponto,  $s(t)$ , e pela função de sensibilidade transversal do feixe,  $b(d)$ , onde  $d$  é a distância a partir do eixo central do feixe do transdutor, através de (TORP, 1995)

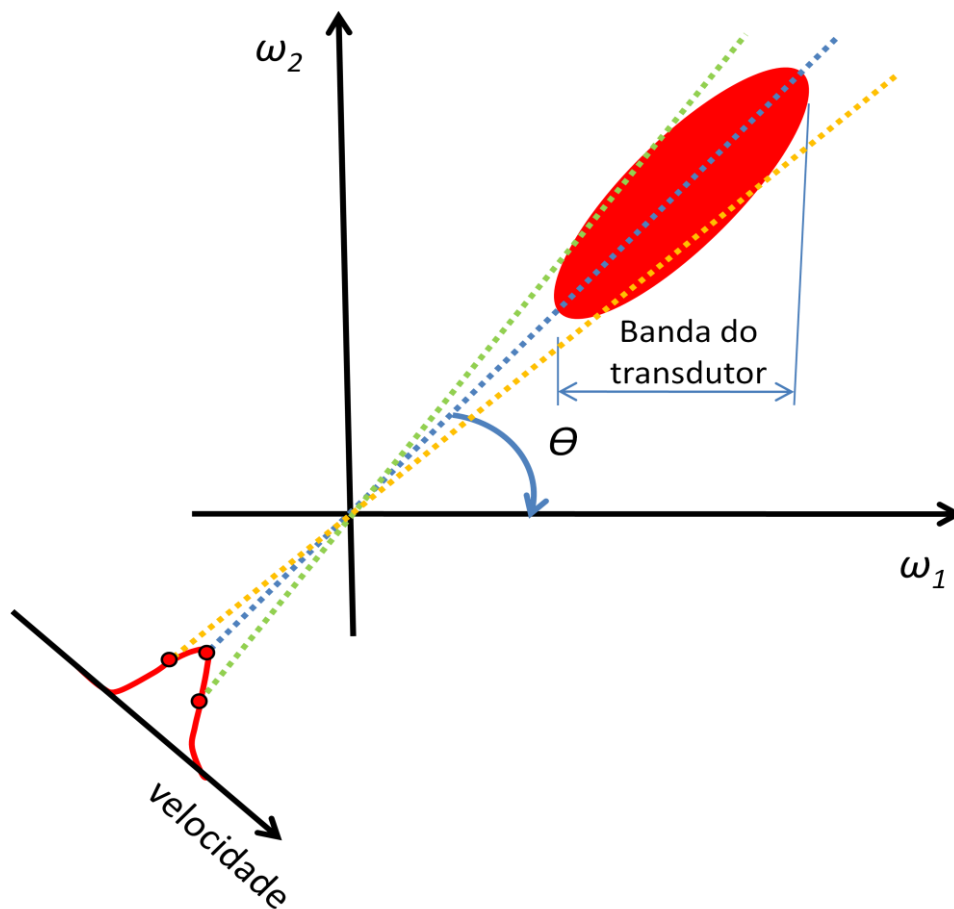
$$R_x(\tau, m) = s_2(\tau - mt_s) b_2(v_t T_{prf} m),$$

$$t_s = -\frac{2v_r}{c} T_{prf}, \quad (54)$$

sendo  $s_2$  e  $b_2$  o resultado da autocorrelação de  $s$  e  $b$ , respectivamente. A variável  $v_t$  quantifica a velocidade que o refletor se move transversalmente ao feixe de ultrassom. Notando que  $s_2$  é atrasado de  $t_s$  devido ao movimento do elemento refletor de uma emissão para outra. O valor negativo de  $t_s$  foi convencionado para indicar que o refletor se afasta do transdutor. Substituindo a equação (54) na equação (53), a densidade espectral de energia será dada por (TORP, 1995):

$$G_x(\omega_1, \omega_2) = |S(\omega_1)|^2 \left| B \left[ \frac{1}{v_t} \left( \omega_2 - \frac{2v_r}{c} \omega_1 \right) \right] \right|^2, \quad (55)$$

onde  $S(\omega_1)$  e  $B(\omega_2)$  são as transformadas de Fourier de  $s$  e  $b$ , respectivamente. O argumento da função  $B(\omega_2)$  é nulo ao longo da reta com inclinação  $\frac{2v_r}{c} \omega_1$  no plano  $(\omega_1, \omega_2)$ , que representa a translação de tempo,  $t_s$ , entre emissões. A densidade espectral de energia de  $B$  estará concentrada ao longo dessa reta, como mostra a Figura 29, devido à função  $B$  ter uma característica de passa-baixas. A função  $S(\omega_1)$  representa a resposta em frequência do pulso emitido pelo transdutor que limita a reta espectral dada por  $B$ , no eixo de  $w_1$ , a estar definida somente na largura de banda do pulso de ultrassom (Figura 29).



**Figura 29 – Densidade espectral de potência idealizada e espectro projetado radialmente.**  
**Fonte: Autoria própria**

Para processamento via computador, o sinal  $x_p(t, k)$  precisa também ser amostrado no eixo horizontal do tempo e apenas um intervalo de observação finito é disponível, portanto



a função da densidade espectral de energia não pode ser obtida diretamente. Mas pode ser estimada através da transformada discreta de Fourier do sinal de entrada. Seja a observação de  $N$  pontos de tempo de trânsito e  $M$  emissões, representados pela sequência discreta  $x_{pd}[t_d, k_d] = x_p(t_d T_s, k_d T_{prf})$ , com  $t_d = 0, 1, \dots, N-1$  e  $k_d = 0, 1, \dots, M-1$ , e considerando uma amostragem em intervalos de tempos uniformes,  $T_s$  e  $T_{prf}$ . A densidade espectral de energia de um processo estocástico pode ser estimada através de (TORP, 2000)

$$\hat{G}_x(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{NM} X(\omega_1, \omega_2)^* X(\omega_1, \omega_2), \quad (56)$$

onde o símbolo  $*$  indica o operador de complexo conjugado e  $X(\omega_1, \omega_2)$  é dado por

$$X(\omega_1, \omega_2) = \sum_{k_d=0}^{M-1} \sum_{t_d=0}^{N-1} x_{pd}[t_d, k_d] w[t_d, k_d] e^{-jt_d \omega_1} e^{-jk_d \omega_2}, \quad (57)$$

e a função  $w[t_d, k_d]$  descreve uma janela de Hamming bidimensional construída a partir da janela 1D como

$$h_L(w) = \begin{cases} 1,59 \left[ 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi m}{L}\right) \right], & \text{para } m = 0, 1, 2, \dots, L-1, \\ 0, & \text{do contrário} \end{cases} \quad (58)$$

$$H_l = [h_M(1) \quad \dots \quad h_M(M-1)]^T, \quad (59)$$

$$Y_C = [H_l \quad \dots \quad H_l], \text{ com } N-1 \text{ colunas}, \quad (60)$$

$$H_c = [h_M(1) \quad \dots \quad h_M(M-1)], \quad (61)$$

$$Y_L = [H_c \quad \dots \quad H_c]^T, \text{ com } M-1 \text{ linhas}, \quad (62)$$

$$w = \begin{bmatrix} y_L(1,1)y_C(1,1) & \cdots & y_L(1,N-1)y_C(1,N-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_L(M-1,1)y_C(M-1,1) & \cdots & y_L(M-1,N-1)y_C(M-1,N-1) \end{bmatrix}. \quad (63)$$

A equação (56) estima a representação de Fourier de  $x_{pd}[t_d, k_d]$  através da ponderação com uma janela de Hamming. O resultado da equação (56) é o mapeamento dos ecos dos refletores em movimento como uma geometria de formato elíptico no espaço bidimensional de Fourier da densidade espectral de energia (Figura 29). O ângulo formado pelo maior eixo da elipse e o eixo coordenado do espaço de Fourier está relacionado com a velocidade das partículas no meio (PHILIPS, 1990; WILSON, 1991) pela seguinte equação:

$$\tan(\theta) = \frac{2v_r}{c}, \quad (64)$$

onde  $c$  é a velocidade de propagação do som no meio e  $v_r$  a componente de velocidade radial, relativa ao movimento das partículas na direção do eixo do transdutor. Assim, conhecendo-se velocidade do som no meio,  $c$ , e, se for possível obter o coeficiente angular da reta onde se concentram os valores da densidade espectral do processo então se pode encontrar uma estimativa da velocidade dos elementos refletores. Utilizando como centro a origem e fazendo a somatória de todos os pontos da Figura 29 que tem o mesmo coeficiente angular, obtêm-se o que se denomina de projeções radiais da amplitude da densidade espectral de potência. Fazendo a projeção radial para todos os ângulos correspondentes às velocidades possíveis das partículas chega-se no espectro de velocidades da Figura 29. O valor de pico do espectro de velocidade está relacionado com o ângulo,  $\theta$ , formado pelo maior eixo da elipse e o eixo coordenado do espaço de Fourier, e, portanto uma boa estimativa da velocidade é obtida do argumento do valor de pico (PHILIPS, 1990; WILSON, 1991). A implementação do algoritmo de projeções radiais utilizadas neste trabalho foram baseadas em Philips (1990) e se encontram descritas no Apêndice C. A metodologia descrita nesta subseção utiliza uma janela 2D na estimativa da densidade espectral de energia que se difere da proposta por Torp (1995) onde a janela aplicada é de uma dimensão. Na última, a estimativa da densidade espectral é calculada para cada projeção radial, que é mais eficiente computacionalmente que a primeira que calcula a densidade antes e depois efetua a projeção. Entretanto, a técnica modificada

aplicada neste trabalho é de implementação simples e possui mais flexibilidade para eventuais alterações.

A grande diferença desta técnica para as demais está na quantidade de informação que se pode obter da análise do espectro das velocidades. Nas metodologias convencionais, temos apenas a velocidade média como resultado. Com o VMS pode-se obter, não somente a informação da velocidade, mas a sua amplitude na distribuição espectral. O custo dessa quantidade maior de dados retornados está num volume maior de processamento computacional.

### 3.4 PRÉ-PROCESSAMENTO

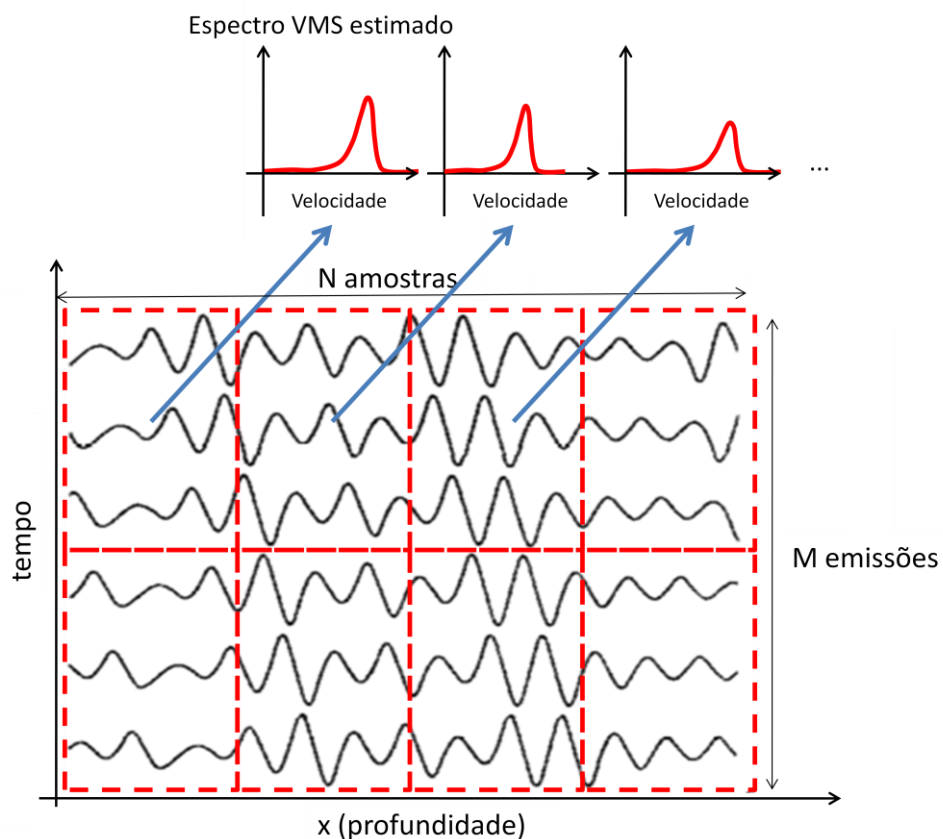
Os dados adquiridos precisam ser tratados de maneira adequada antes de entrarem nos algoritmos de cálculo de velocidade. As próximas subseções tratam: da divisão da matriz de pré-envoltória complexa em janelas espaço-temporais visando alcançar menores resoluções espaciais e temporais antes de entrar no algoritmo de cálculo de velocidade e a remoção dos dados que não concernem a velocidade do escoamento através de filtragem.

#### 3.4.1 Segmentação dos dados de entrada

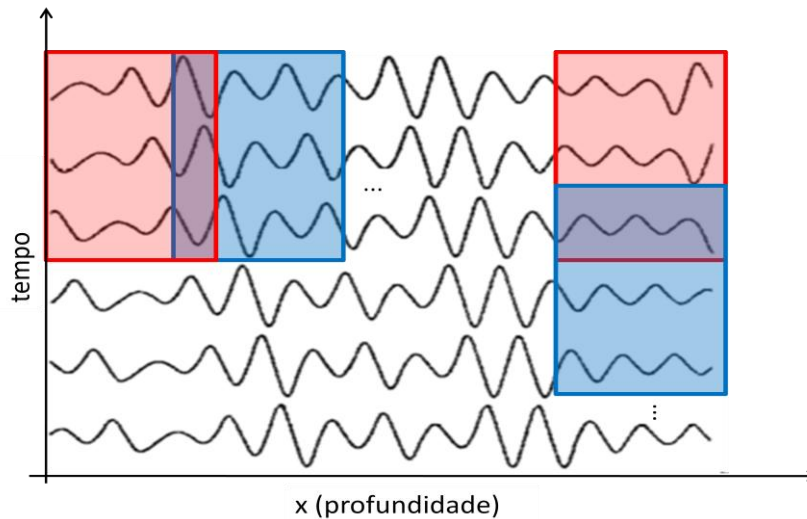
Obter o perfil de valores da velocidade ao longo do espaço e tempo envolve segmentar os dados da demodulação complexa. Como o algoritmo de estimação de velocidade recebe como entrada uma matriz de duas dimensões, pode-se segmentá-la tanto no espaço como no tempo. Em geral a divisão é uniforme para todos os segmentos. A resolução espacial é a faixa adotada para o eixo da profundidade e tem o seu valor mínimo limitado pela resolução axial do transdutor (equação (18)). A resolução temporal compreende o número de emissões que serão utilizados na estimação da velocidade e está limitada pela velocidade máxima que se deseja medir. A Figura 30 mostra um exemplo de segmentação dos dados.

Deve-se notar que o desempenho da estimação da velocidade pode ser degradado caso exista múltiplos elementos refletoras com diferentes velocidades, como bolhas, por exemplo, dentro da janela de medição. Neste caso, o espectro de velocidades irá apresentar múltiplos picos que irá prejudicar a estimação da velocidade. Entretanto, esta situação pode ser evitada minimizando as dimensões da janela espaço-temporal de estimação. A escolha do tamanho da janela irá determinar a resolução espaço-temporal da velocidade medida. A escolha da resolução temporal se dá através da máxima velocidade que pode ser encontrada no escoamento. A resolução espacial pode ser escolhida baseada na menor dimensão de bolha/partícula que o escoamento pode apresentar.

As janelas da Figura 30 podem ser sobrepostas, tanto no eixo temporal quanto no espacial, Figura 31, para que se aumente o número de pontos de velocidade estimados. Além do aumento na matriz de valores de velocidade medidos, a sobreposição temporal de 50% não acarreta em diminuição da variância da velocidade (TORP, 2000).



**Figura 30 – Exemplo de segmentação dos dados.**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 31 – Exemplo de sobreposição espacial e temporal. Onde a sobreposição espacial é de 25% e a sobreposição temporal de 33,33%.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.4.2 Filtro de cancelamento de ecos estacionários

Quando se aplica um transdutor de ultrassom externamente à tubulação ocorrerá uma forte reflexão nas paredes da tubulação. Como a tubulação não se move, isto resultará num eco que ocorre sempre na mesma posição em todas as emissões. Esse eco estacionário irá resultar numa velocidade estimada próxima a zero. Entretanto, a amplitude desse eco é muito maior que a de um eco de partícula. Assim a medida da velocidade das partículas ficará comprometida nas vizinhanças da parede da tubulação. Para que somente a informação relativa ao escoamento entre no algoritmo de estimação de velocidade é necessária a aplicação de filtros que eliminem a componente de velocidade zero gerada pelas paredes da tubulação.

Três tipos de metodologia são comumente empregados. A primeira delas, a mais simples; consiste em realizar a subtração entre duas linhas consecutivas:

Considerando que o sinal de uma emissão consiste de uma componente estacionária,  $r_{ti}(t)$ , e outra devido ao movimento dos elementos refletores,  $r_{si}(t)$ , então o sinal recebido na emissão 1 pode ser descrito como

$$r_1(t) = r_{t1}(t) + r_{s1}(t). \quad (65)$$

Da mesma forma o sinal da segunda emissão é

$$r_2(t) = r_{t2}(t) + r_{s2}(t). \quad (66)$$

Sendo que a componente não estacionária da segunda emissão está relacionada com a mesma componente da emissão 1 pela equação (40) reproduzida novamente aqui como

$$r_{s2}(t) = r_{s1}(t - t_s). \quad (67)$$

Considerando que a componente estacionária não muda de uma emissão para outra, então:

$$r_{t2}(t) = r_{t1}(t). \quad (68)$$

Então o filtro de eliminação de ecos estacionários é definido como

$$y_i = 0,5(r_i - r_{i-1}). \quad (69)$$

onde  $r_i$  é dado pela equação (65). Análises sobre a resposta em frequência e demais informações sobre esta técnica podem ser encontradas em Jensen (2008).

Utilizando a equação (68) para as duas primeiras emissões, resulta em:

$$y_2 = 0,5(r_2(t) - r_1(t)). \quad (70)$$

$$y_2 = 0,5(r_1(t - t_s) - r_1(t)). \quad (71)$$

A equação (69) pode ser vista como uma implementação de um filtro FIR. Desta forma, a segunda abordagem é a generalização desta primeira, estendendo-a para qualquer tipo de filtros FIR passa-altas, cuja função de transferência é dada por: (SCHLAIKJER, 2001 e JENSEN, 2008).

$$H_i(f) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_{k,i} e^{-j2\pi(k-i)f/f_{sh}}, \quad (72)$$

onde  $a_{k,i}$  são os coeficientes do filtro,  $i$  é a linha na qual o sinal do escoamento está sendo obtido,  $k$  é o número de linhas que entram no filtro,  $N_c$  é o número total de linhas e  $f_{sh}$  é dada por:

$$f_{sh} = \frac{c}{2v_r T_{prf}}. \quad (73)$$

A última solução proposta por HOEKS et al.(1991) é o filtro de regressão linear. Ele se baseia no fato dos ecos das paredes, ao longo das várias emissões, poderem ser vistos como linhas com coeficiente angular nulo. A equação da regressão linear é:

$$z_i(t) = m_t + i s_t, \quad (74)$$

onde  $m_t$  é a média das amostras na profundidade definida pelo tempo de propagação  $t$  e  $i = -(N_c - 1)/2 \dots 0 \dots (N_c - 1)/2$  onde  $N_c$  é um número ímpar de linhas. A inclinação é representada pela variável  $s_t$  dada como (SCHLAIKJER, 2001):

$$s_t = 4 \sum_{i=1}^{(N_c-1)/2} \frac{(r_i - r_{-i})}{N_c^2 - 1}. \quad (75)$$

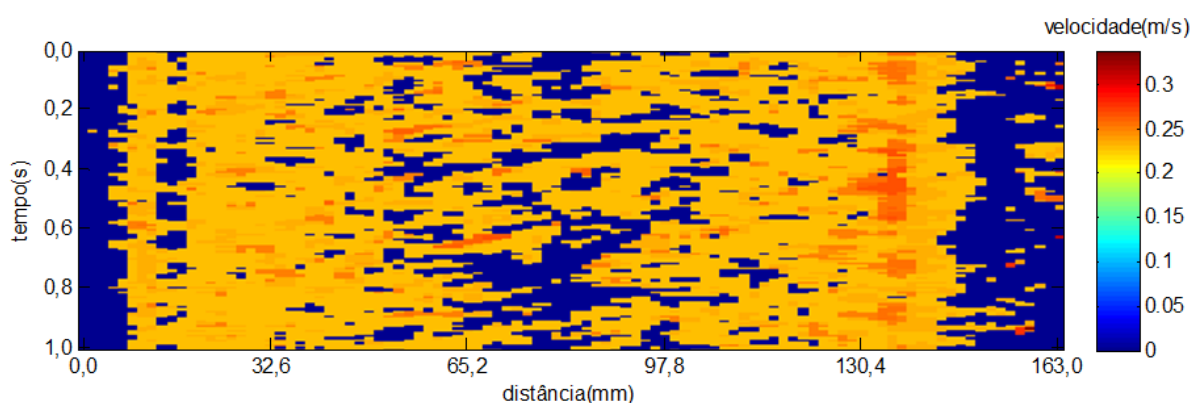
E, portanto a saída do filtro de cancelamento por regressão linear será:

$$y_i(t) = r_i(t) - z_i(t). \quad (76)$$

Cada topologia de filtro encontra uma aplicação em que ele fornece a melhor estimativa de velocidade.

### 3.5 PÓS-PROCESSAMENTO

Os dados segmentados após terem a velocidade estimada darão origem a um mapeamento da velocidade ao longo do eixo do transdutor para uma sequência de emissões que ocorrem ao longo de um intervalo tempo. Assim tem-se um gráfico que relaciona os valores de velocidade no espaço versus tempo. Essa representação dos dados é denominada de Mapeamento ou Distribuição espaço-temporal das velocidades no escoamento. A Figura 29 é um exemplo dessa forma de apresentar as velocidades no escoamento.



**Figura 32 – Exemplo de um mapeamento espaço-temporal da velocidade. O mapa da velocidade deveria apresentar um valor uniforme de velocidades. Entretanto, apresenta vários pontos zeros que representam regiões onde não foi possível medir a velocidade.**

**Fonte: Autoria própria.**

A distribuição espaço-temporal das velocidades num escoamento está mecanicamente correlacionada e por isso é fisicamente impossível que ocorra uma grande variação de valores de velocidade entre pontos adjacentes. Entretanto deficiências intrínsecas dos algoritmos de estimação de velocidade acabam gerando, num intervalo de profundidade e de tempo pequenos, valores de velocidades com grande amplitude de variação entre eles, caracterizando um comportamento que não é fisicamente observável. O uso de filtros espaciais serve justamente para corrigir tais imperfeições para que valores vizinhos de velocidade estejam correlacionados. Para atingir esse grau de suavização do mapeamento de velocidades é utilizado filtros de processamento de imagem.

O filtro não linear de mediana é uma das soluções mais empregadas para esse pós-processamento (SCHLAIKJER, 2001). Ele consiste em tomar um conjunto de valores e



reordená-los de forma crescente e resulta como saída o valor central do conjunto reordenado. Considere um vetor 1D de 5 elementos,

$$V = \{4,2,3,1,7\}. \quad (77)$$

Para aplicar o filtro de mediana consecutivamente em  $V$ , de 3 em 3 elementos, tem-se que acrescentar zeros no início e final de  $V$  para que a saída apresente o mesmo número de elementos em  $V$ , assim:

$\{0,4,2\}$ ->reordenando  $\{0,2,4\}$  =>elemento central  $\{2\}$ -saída do filtro : $y(1)=2$ ,  
 $\{4,2,3\}$ ->reordenando  $\{2,3,4\}$  =>elemento central  $\{3\}$  saída do filtro : $y(2)=3$ ,  
 $\{2,3,1\}$ ->reordenando  $\{1,2,3\}$  =>elemento central  $\{2\}$ -saída do filtro : $y(3)=2$ ,  
 $\{3,1,7\}$ ->reordenando  $\{1,3,7\}$  =>elemento central  $\{3\}$ -saída do filtro : $y(4)=3$ ,  
 $\{1,7,0\}$ ->reordenando  $\{0,1,7\}$  =>elemento central  $\{1\}$ -saída do filtro : $y(5)=1$ .

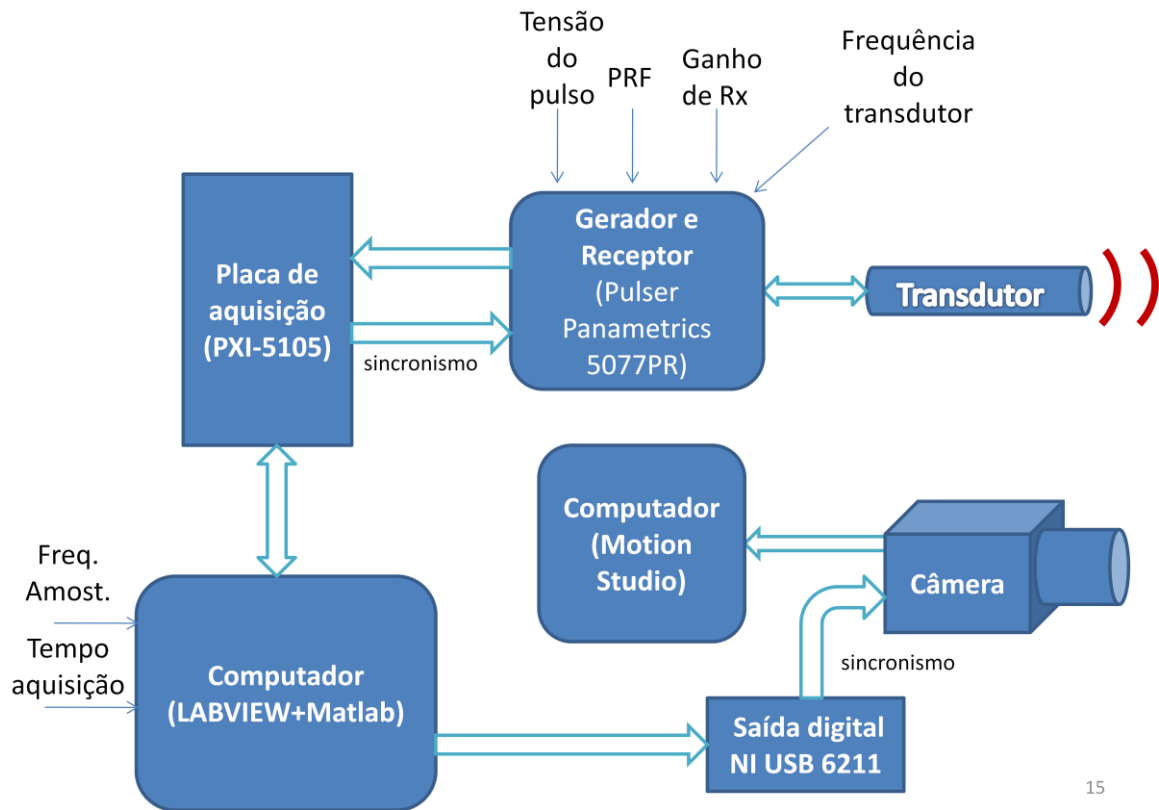
O resultado final após a aplicação do filtro é:

$$Y = \{2,3,2,2,1\}. \quad (78)$$

Comparando com a equação (77),  $Y$  possui variação bem menor de valores. Uma estratégia semelhante à de uma dimensão é adotada para duas dimensões, o que muda é o valor que se acrescenta no início e fim do vetor para preservar o tamanho. No Matlab é utilizado a função *medfilt2* para realizar esse filtro em 2D.

### 3.6 COMPOSIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Para a aplicação da técnica de estimação espectral da velocidade foi utilizado os seguintes equipamentos, conforme Figura 33.



15

**Figura 33 – Diagrama em blocos do sistema de medição**  
**Fonte: Autoria Própria.**

O sistema desenvolvido é composto de um gerador e receptor de pulsos de ultrassom que utiliza um equipamento comercial da *Panametrics*, modelo 5077PR. Também chamado de pulsador, ele é capaz de operar transdutores entre 1 e 10 MHz e no sistema proposto foi limitado a trabalhar apenas no modo pulso-eco (mesmo transdutor transmite e recebe os sinais). Como receptor, ele incorpora circuitos analógicos que permite amplificar e atenuar os sinais dos ecos recebidos. Possui duas restrições que limitam as aplicações do sistema de medição: só emite um ciclo de pulso de ultrassom por emissão e a frequência de repetição de pulsos (*pulse repetition frequency*) está limitada a uma taxa máxima de 5 KHz.

Os sinais recebidos pelo receptor são digitalizados por um sistema PXI, modelo 1001B, equipado com uma placa de aquisição de dados PXI-5105, que permite realizar taxas de amostragem de até 60 Mamostras/s e 12 bits de resolução. Um programa desenvolvido em ambiente Labview foi desenvolvido para controlar a forma como os dados são adquiridos e armazenados pelo PXI. Uma câmera de filmagem rápida foi acrescentada no sistema como um método alternativo de medição de velocidade e de medição acurada da posição da interface gasosa, para fins de validação. Para sincronizar o início que os dados são adquiridos

com o início da gravação das imagens, o programa do Labview comunica via porta USB com uma placa de saídas digitais, modelo NI-6211 do fabricante *National Instruments*, um sinal de sincronismo para a câmera de filmagem rápida. Os dados adquiridos pelo Labview são processados em ambiente Matlab através de *scripts* que implementam a estimação da velocidade.

## 4 EXPERIMENTOS E CONTRIBUIÇÃO

Neste capítulo são apresentados os experimentos utilizados para validação do sistema de medição desenvolvido que compreendem o escoamento em cilindro girante e o escoamento interno horizontal monofásico. Na segunda parte é apresentada a contribuição desta Tese que trata do desenvolvimento de um método para identificação da posição da interface gás-líquido num escoamento de superfície livre de ascensão de bolhas em líquido estagnado. A exatidão e repetitividade da técnica proposta são avaliadas através de uma série de variações do experimento de ascensão bolhas.

### 4.1 ESCOAMENTO EM CILINDRO GIRANTE

Com o intuito de validar o sistema de medição desenvolvido, foi utilizado o escoamento em cilindro girante. Esse experimento possui uma solução teórica bem definida tornando-o muito empregado para verificar a acurácia da medição. (KITAURA et al.,2004; TAKEDA, 1995).

#### 4.1.1 Modelo teórico

Para utilizar o cilindro girante é necessário derivar uma relação entre a velocidade medida pelo transdutor de ultrassom e a velocidade angular de rotação do cilindro.

Neste sistema, um cilindro cheio de água e partículas refletoras de ultrassom é posto a girar com uma velocidade angular  $w$  constante. A água arrastada pelo cilindro começa a se mover, e, depois de certo período de tempo, ela entra em regime estacionário, comportando-se da mesma maneira que um corpo rígido. Considere a partícula  $P$  da Figura 34 girando como um corpo rígido localizada a uma distância  $r$  do eixo do cilindro. Quando a partícula descrever um ângulo  $\theta_c$ , ela terá percorrido um arco de comprimento  $s$ , igual a:

$$s = r\theta_c. \quad (79)$$

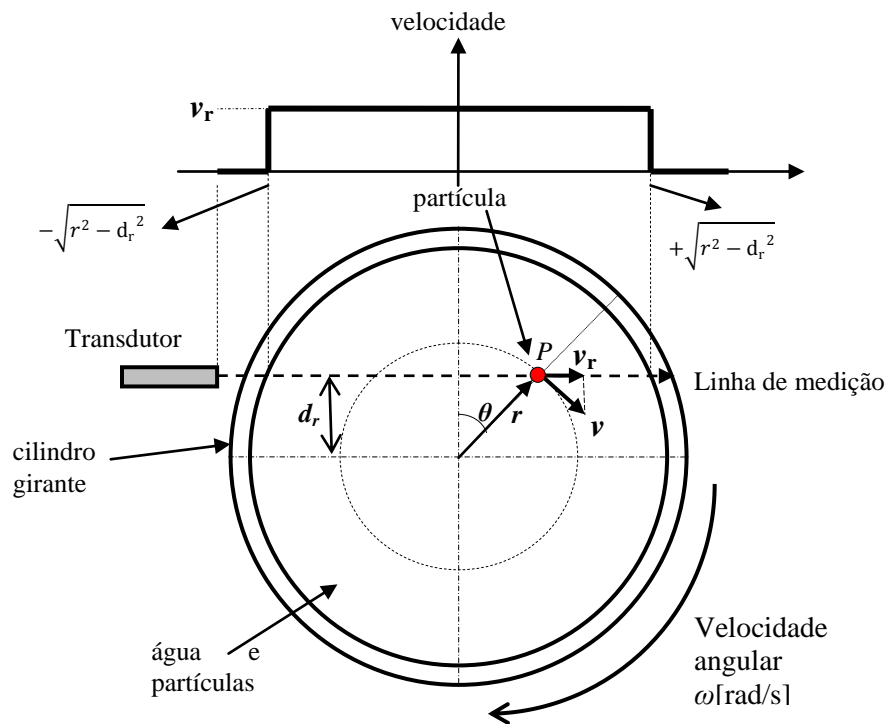
A velocidade da partícula é obtida derivando a equação (79) em relação ao tempo:

$$\frac{ds}{dt} = r \frac{d\theta_c}{dt} \quad (80)$$

A equação (80) é normalmente referenciada como:

$$v = r\omega \quad (81)$$

Sendo  $v = ds/dt$  chamada de velocidade linear e  $\omega = d\theta_c/dt$  denominada de velocidade angular.



**Figura 34 – Diagrama do movimento das partículas no sistema de um cilindro girante. Um cilindro cheio de água e partículas é posto a girar com velocidade angular  $w$ . Um transdutor de ultrassom posicionado na corda a uma distância  $d_r$  mede a componente de velocidade linear ao longo da sua linha de medição. É mostrado que o perfil de velocidade ao longo da medição é constante.**

Fonte: Autoria própria.

Observando a Figura 34, pode-se verificar que a distância  $r$  está relacionada à posição relativa do transdutor de ultrassom ao eixo do cilindro,  $d_r$ , através da relação:

$$r = \frac{d_r}{\cos(\theta_c)} \quad (82)$$

Então pela equação (81) pode-se relacionar a velocidade linear como:

$$v = \frac{d_r}{\cos(\theta_c)} \omega \quad (83)$$

O transdutor de ultrassom mede somente a componente de velocidade,  $v_r$ , ao longo de sua linha de medição, que forma com sua componente  $v$ , o mesmo ângulo  $\theta$ , portanto:

$$v_r = v \cos(\theta_c) \quad (84)$$

Por fim, substituindo a equação (83) na (84), obtemos a relação entre a velocidade medida e a rotação do cilindro:

$$v_r = d_r \omega \quad (85)$$

Como a distância  $d_r$  é fixa e considerando a velocidade angular  $\omega$  constante conclui-se que a velocidade medida pelo transdutor será sempre a mesma em qualquer ponto da sua linha de medição, como mostra o gráfico da Figura 34. Essa resposta bem definida é o que torna este tipo de experimento bastante interessante para validar e verificar a acurácia de algoritmos de medição de velocidade. O posicionamento do transdutor em relação ao eixo de giro é uma fonte de incerteza, entretanto os equipamentos de medição de velocidade angular (tacômetros) tem erros típicos muito baixos, na casa de 0,1 RPM (rotações por minuto), devido a isso é possível através de levantamento de curva de calibração corrigir o erro do posicionamento do transdutor.

Segundo Takeda (2012), para medir a acurácia da medição deve ser feita a avaliação de quanto o perfil de velocidade espacial medido se parece com o perfil teórico. O perfil espacial normalizado da Figura 34 pode ser expresso da seguinte forma:

$$v_r(x) = \begin{cases} V, & -\sqrt{r^2 - d_r^2} \leq x \leq +\sqrt{r^2 - d_r^2}, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (86)$$

onde  $V$  é o valor médio espacial ou o momento de ordem zero de  $v_r(x)$ .

Os momentos de ordem  $n$  do perfil

$$M_n = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n v_r(x) dx \quad (87)$$

são parâmetros que podem ser utilizados para avaliar o quanto o perfil medido reproduz o do modelo teórico. Por exemplo, o terceiro momento indica a simetria do perfil, enquanto que o quarto momento o grau de planificação do perfil. Os valores dos momentos para o perfil de velocidade teórico do cilindro girante são mostrados na Tabela 2 referenciados pela altura média.

**Tabela 2 – Resultados dos momentos de ordem  $n$  para perfil teórico**

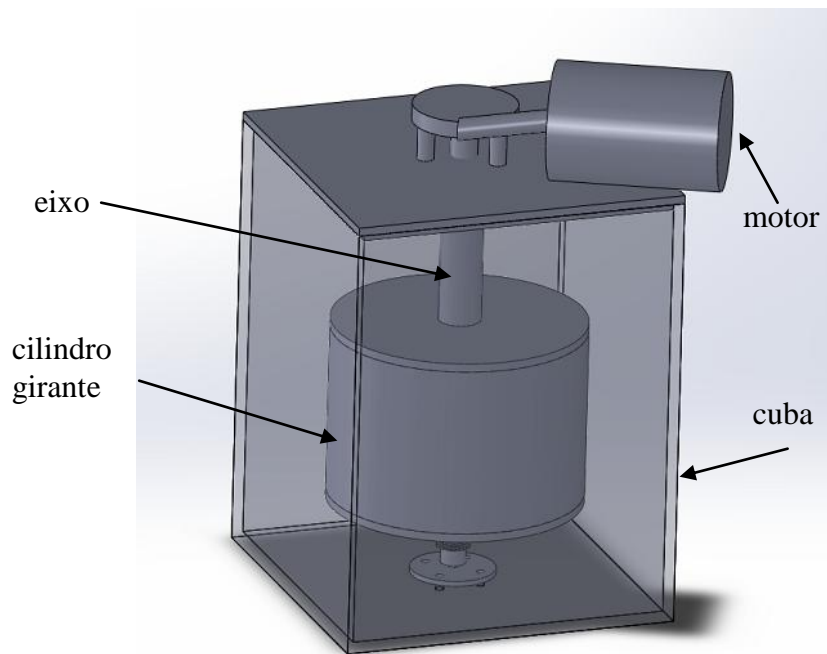
Momento	Resultado teórico	Significado
$M_0$	$V$	Altura média
$M_1$	$0$	Posição
$M_2$	$V/12$	Variância
$M_3$	$0$	Simetria
$M_4$	$V/80$	Planificação

**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.2 Descrição do experimento

No experimento, foi utilizado um cilindro de 142 mm de diâmetro e 100 mm de altura que foi preenchido com 1,5 litros de água filtrada. Para rastrear o movimento do líquido foram acrescentadas partículas de copoliamida da marca EMS-GRILTECH, tipo 1A P82. As mesmas possuem densidade de  $1,07 \text{ g/cm}^3$  e diâmetro médio de 80 e 200  $\mu\text{m}$ . O tamanho das partículas determina a frequência central mínima de transdutor deve ter para conseguir detectá-las. Elas devem ter um diâmetro de pelo menos um quarto do comprimento de onda

do feixe de ultrassom. Para um transdutor de 4 MHz, operando na água, o diâmetro mínimo deve ser de 93  $\mu\text{m}$ . Outro fator importante a ser considerado é se elas seguem o escoamento do líquido de forma acurada. É sabido que isso ocorre quando as partículas têm densidade muito próxima do líquido em que estão imersas, além de estarem restritas a um diâmetro máximo de 100  $\mu\text{m}$ , no caso específico da água. Aproximadamente 8 gramas dessas partículas foram misturadas a água do cilindro, resultando numa concentração de cerca de 5,3g/L. O sistema projetado para o experimento é mostrado na Figura 35.



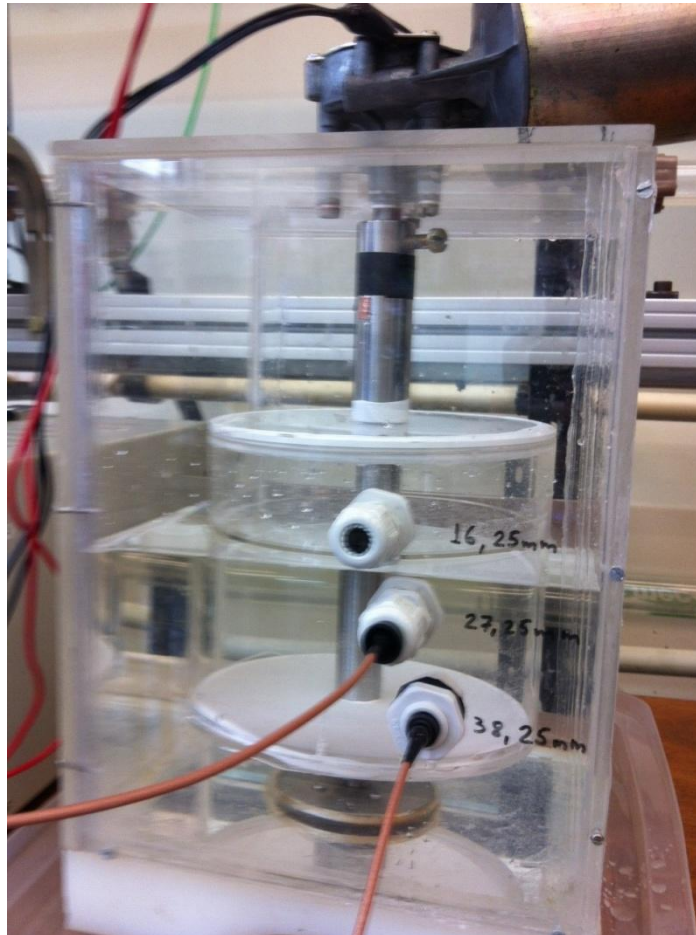
**Figura 35 – Vista 3D do conjunto cilindro, motor e cuba. Cilindro e cuba estão preenchidos com água filtrada. Partículas são acrescentadas apenas dentro do cilindro. Fonte: Autoria própria.**

O cilindro é acondicionado numa cuba cheia de água que servirá de acoplante para o transdutor usado no ensaio. O mesmo é fixado a um eixo acoplado ao motor que consegue efetuar rotações horárias e anti-horárias numa faixa de 0 a 150 RPM.

A cuba foi perfurada em 3 posições para fixação de transdutores, conforme mostra a Figura 36. O modelo de transdutor utilizado foi o Metflow Tx4-5-8 com frequência central de 4 MHz. As posições relativas do transdutor de ultrassom em relação ao eixo de rotação foram projetadas para serem 16,25 mm, 27,25 mm e 38,25 mm. No experimento optou-se por utilizar somente a posição do meio por apresentar um sinal mais propício para medida de velocidade. Foi verificado também por medições e calibração que o seu posicionamento relativo em relação ao eixo,  $d_r$ , estava incorreto e foi corrigido de 27,25 mm para 29 mm.



Posicionando o transdutor a 29 mm do centro do eixo, a sua linha de medição interna ao cilindro, será uma corda da circunferência e terá comprimento de 129,4 mm.



**Figura 36 – Foto da montagem do experimento de cilindro girante. Na cuba foram realizadas 3 furações e 2 transdutores foram instalados.**

**Fonte: Autoria própria.**

Para validar os valores de rotações medidos pelo sistema de medição proposto um tacômetro óptico com  $\pm 0,1$  RPM de erro foi utilizado. No sistema de medição a taxa de amostragem utilizada foi de 60 MHz e cada emissão é amostrada até uma profundidade 197 mm ou 16000 amostras. Uma vez posto o cilindro a girar é necessário aguardar o escoamento entrar em regime estacionário. Antes desse tempo, o líquido não se comporta como um corpo sólido. O tempo de estabilização do escoamento varia de acordo com a velocidade de rotação do cilindro e foi determinado de forma empírica. Para essa montagem ele varia de 2 minutos para rotações de 50 a 100 RPM e 2,5 minutos para rotações abaixo de 50 RPM.

O transdutor foi excitado a uma taxa de 5000 vezes por segundo com um pulso de tensão de 100 V. Na recepção foi feita a configuração para ampliar o sinal recebido por um fator de 49 dB.

O algoritmo de estimação de velocidade foi configurado com os seguintes parâmetros:

Resolução espacial: 1,5 mm

Resolução temporal: 20 ms

Resolução de rotação: 0,1 RPM

Máxima rotação: 250 RPM

A distribuição da rotação ao longo da linha de medição do ultrassom, também denominado de perfil espacial da velocidade de rotação, foi medida realizando-se a média de 2 segundos de dados. Para realizar o pós-processamento utilizou-se a rotina *medifilt2* do Matlab configurada para reordenar os 3 pixels tanto no eixo do espaço como no do tempo. Na Figura 37 são apresentados os resultados do perfil da rotação do líquido em função da distância na linha de medição para as velocidades angulares de 50, 60 e 70 RPM e sentidos anti-horário (rotação positiva). Os momentos até a quarta ordem foram obtidos para cada perfil medido. Os erros nos momentos do perfil medido foram calculados usando como referência os valores da Tabela 2 e estão resumidos na Tabela 3.

**Tabela 3– Erros entre momento teórico e medido para escoamento em cilindro**

Rotação (RPM)	Erro relativo $M_0(\%)$	Erro absoluto $M_1$	Erro relativo $M_2(\%)$	Erro absoluto $M_3$	Erro relativo $M_4(\%)$
50	0,94	-0,0038	3,55	-0,0001	5,43
60	0,84	-0,0291	3,57	-0,0041	5,50
70	1,61	0,0271	3,88	0,0081	5,54

**Fonte: Autoria própria.**

Todos os perfis de rotação da Figura 37 apresentam uma queda nos valores próximos ao centro do cilindro. Isso se reflete no valor do erro do momento de quarta ordem (Tabela 3). Como esse momento ( $M_4$ ) está relacionado ao grau de planificação do perfil, a inclinação dos perfis implica em valores de  $M_4$  maiores que o valor de referência. Por isso o seu erro acaba sendo o maior relativamente aos demais da Tabela 3. Acredita-se que três fatores possam estar

atuando simultaneamente ou individualmente para esse efeito observado no perfil. O primeiro fator é devido ao segundo eco da interface entre água e parede do cilindro (acoplamento do transdutor) que, devido a distância entre transdutor e cilindro, acaba ocorrendo próximo ao centro do cilindro. Como esse segundo eco sempre aparece na mesma posição a cada emissão, ele resultará em velocidade estimada próxima de zero nessa região. O segundo motivo pode estar no escoamento não estar totalmente desenvolvido na parte central, dessa forma a velocidade nesse trecho fica menor do que nas extremidades. O último fator está relacionado à diferença entre a densidade das partículas ( $1,07 \text{ g/cm}^3$ ) e a água ( $1,00 \text{ g/cm}^3$ ). Como as partículas são mais densas que a água, as mesmas acabam decantando durante o período de tempo de 2 minutos que foi adotado para aguardar o escoamento entrar em regime. Isso só acontece na região central porque a força centrífuga causada pela rotação impede que as partículas nas extremidades decantem tão rapidamente.

Observa-se que os perfis de velocidades medidos (Figura 37) apresentam valores maiores no início e fim do cilindro. Isto ocorre devido os filtros de ecos estacionários. Para cancelar os ecos das paredes, esses filtros suprimem os valores de velocidade baixos e aumentam os valores de velocidade alta, o que acaba gerando o efeito observado na Figura 37. O filtro de ecos estacionários é fator fundamental para se medir a velocidade perto da parede do cilindro, portanto apesar dos efeitos indesejáveis que ele pode proporcionar, a sua utilização se faz necessária sempre que se deseja obter o perfil de velocidade até a parede que contém o fluido. Além disso, o feixe de ultrassom diverge ao longo da distância e esse aumento no volume da medição contribui para um aumento na velocidade estimada no final do perfil (TAKEDA, 2012).

Durante a análise dos resultados notou-se que o valor médio ( $M_0$ ) apresentava um erro sistemático que resultava em valores médios cerca de 2 RPM acima do valor de referência. Essa polarização ocorre devido a sensibilidade do algoritmo de estimação da velocidade em relação ao valor central da frequência do transdutor (parâmetro de entrada do algoritmo). Como o transdutor utilizado (Tx4-5-8) de 4 MHz da empresa Metflow não fornece uma curva da frequência de ressonância, não foi possível obter esse parâmetro. Dessa forma, o valor da frequência foi ajustado manualmente, por tentativa e erro, até cessar o erro sistemático. Dessa maneira foi encontrado o valor de 4,1 MHz para a frequência central do transdutor da *Metflow*.

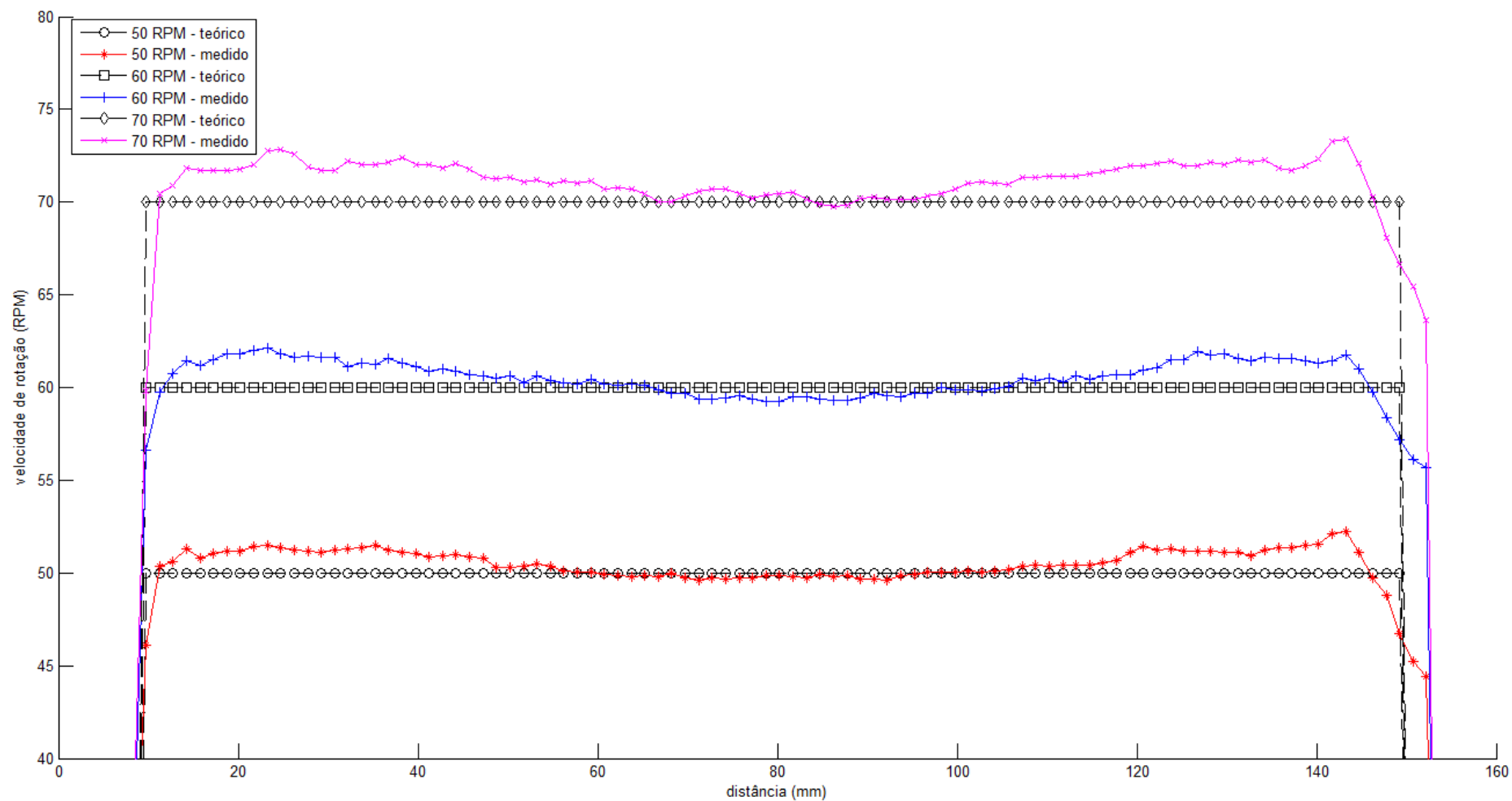


Figura 37 – Perfil da velocidade espacial medido para rotação de 50, 60 e 70 RPM.

Fonte: Autoria própria.

## 4.2 ESCOAMENTO INTERNO HORIZONTAL MONOFÁSICO<sup>2</sup>

O objetivo deste experimento é verificar como se comportam as rotinas de cálculo de velocidade quando aplicadas a uma tubulação. Nessa situação o transdutor precisa ter uma inclinação em relação a normal da tubulação para que a componente da velocidade no sentido do escoamento possa ser medida. Os experimentos foram conduzidos em um escoamento interno, horizontal, em regime turbulento e com apenas uma fase, no caso, água. O perfil da velocidade medido foi comparado com um modelo teórico. O ensaio também foi utilizado para comparar e validar a utilização de um transdutor ultrassônico de duplo elemento na medição do perfil de velocidade. Transdutores de duplo elemento apresentam um cristal piezelétrico para geração do pulso de ultrassom e outro para recepção dos ecos, que faz dele mais sensível a ecos originados de superfícies refletoras irregulares.

### 4.2.1 Modelo teórico

Como não é possível encontrar uma solução teórica para o perfil espacial da velocidade num escoamento turbulento, adota-se a utilização de modelos obtidos de forma empírica. A equação referida como lei da potência é um exemplo desses modelos sendo definida como (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2006)

$$\bar{v}(r) = U_{max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n}, \quad (88)$$

o termo  $U_{max}$  é a velocidade máxima do perfil espacial de velocidade obtida em  $r = 0$ ,  $R$  é o raio interno da tubulação e  $\bar{v}(r)$  é a média temporal da componente da velocidade local em  $r$  no sentido do escoamento. O expoente  $n$  depende do número de Reynolds através de (HINZE, 1975)

---

<sup>2</sup> Partes do conteúdo descrito nesta seção foram originalmente publicados em Coutinho (2014b).

$$n = -1,7 + 1,8 \log Re, \quad (89)$$

onde  $Re$  representa o número de Reynolds e essa relação é válida para  $Re > 20000$ .

#### 4.2.2 Montagem experimental

O esquema da bancada experimental montada está mostrado na Figura 38. A estrutura que suporta o circuito hidráulico é toda de alumínio. O fluido de trabalho, no caso água, fica contido em um reservatório (i), o qual consiste de um tanque de plástico com capacidade de 310 litros. Neste tanque são misturados refletores acústicos de copoliamida, de densidade próxima da água (1,07g/l) e diâmetros de 80 a 200  $\mu\text{m}$  (EMS-GRILTECH, tipo 1A P82), até obter a proporção de 4 gramas de partículas por litro de água. A bomba (ii) impulsiona o fluido para a seção de testes e a vazão propiciada pela mesma é controlada através de um inversor de frequência (iii). Um medidor de vazão mássico por efeito Coriolis(iv) opera próximo à entrada da região de testes e mede a vazão mássica, a temperatura e a densidade do fluido. A temperatura também é medida por um termopar (v) no reservatório. A média da temperatura medida por (v) e por (iv) é a temperatura considerada do fluido, a fim de corrigir possíveis variações de temperatura e propriedades físicas do fluido durante o escoamento. A tubulação da seção de testes é feita de acrílico com diâmetro médio constante de 25,9 mm. Em (vi) e (vii) estão montadas as estações de medição 1 e 2, localizadas a 282D e 288D do ponto X, respectivamente.

Na estação de medição 1, um transdutor de elemento único do fabricante *Metflow*, com 5 mm de diâmetro ativo e 4 MHz de frequência central, foi fixado dentro da caixa de visualização através de um furo angulado em 5,7 graus em relação a normal da tubulação, inclinado na direção do escoamento, como mostra a Figura 39. A caixa de visualização foi preenchida com água, e, portanto, o transdutor é acoplado ao tubo diretamente pelo líquido que o envolve.

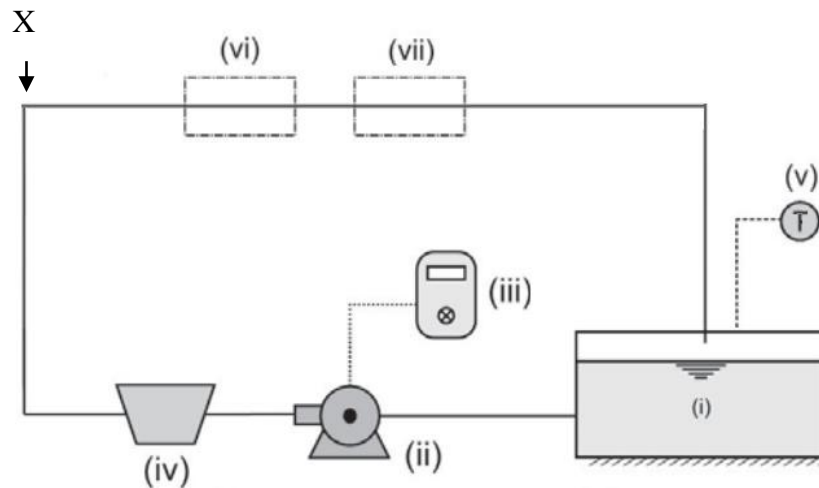


Figura 38 – Diagrama da planta experimental para escoamento horizontal monofásico. Em (i) reservatório de água, (ii) bomba, (iii) inversor de frequência, (iv) medidor Coriolis, (v) medido de temperatura, (vi) estação de medição 1 e (vii) estação de medição 2.

Fonte: Autoria própria.

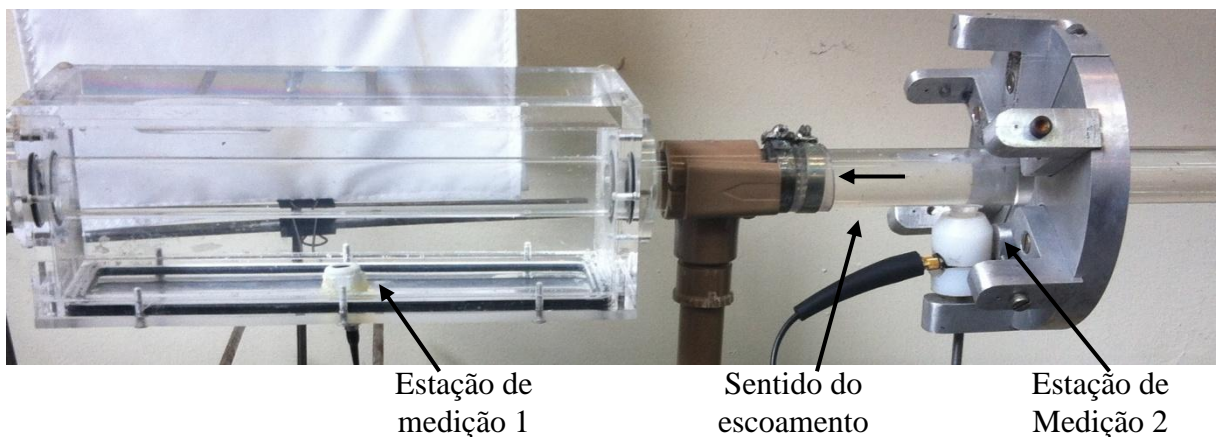


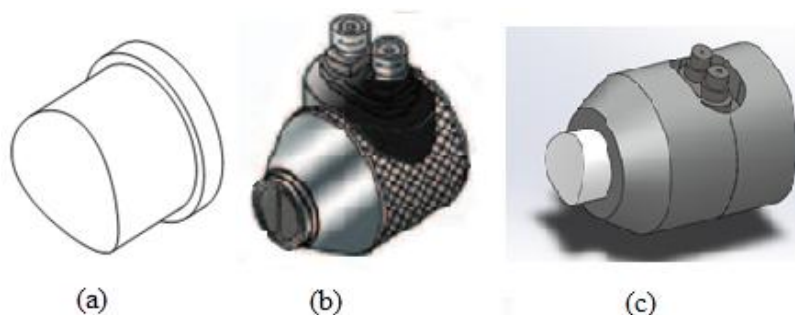
Figura 39 – Foto da montagem dos transdutores nas estações de medição.

Fonte: Autoria própria

Um transdutor de duplo elemento, do fabricante *Olympus* com frequência central de 5,32 MHz, modelo DHC 711RM e 6,35 mm de diâmetro ativo foi montado na estação de medição 2. O mesmo foi instalado de forma a ficar inclinado na direção do escoamento, com ângulo de 4,6 graus com a normal. O objetivo dessa segunda estação é comparar o perfil da velocidade obtido por ela com o perfil obtido pelo transdutor de elemento único – frequentemente mais utilizado para estimação de velocidade. Transdutores de duplo elemento apresentam um elemento dedicado para transmissão e outro para recepção dos pulsos de ultrassom, que faz dele mais sensível a ecos originados de superfícies refletoras irregulares.

Como o transdutor de duplo elemento não pode ser acoplado diretamente pela água o acoplamento dele ao tubo foi realizado através de um meio sólido, por uma cunha de acrílico

mostrada na Figura 40-a. Para fixar o transdutor (Figura 40-b) à cunha foi feita a montagem da Figura 40-c.



**Figura 40 – Desenho mecânico do transdutor duplo elemento da montagem realizada. Em (a) o desenho da cunha em acrílico que fica em contato com o cristal e a parede do tubo. A representação mecânica do transdutor de duplo elemento é mostrada em (b). Em (c) é a montagem que permite acoplar o transdutor a cunha na tubulação.**

**Fonte: Autoria própria**

Para efetuar as medições utilizou o sistema descrito na seção 3.7. A resolução espacial e temporal para o cálculo da velocidade foi configurada em 0,62 mm e 10 ms, respectivamente. O perfil espacial da velocidade foi estimado fazendo a média temporal local num intervalo de 5 segundos. Os pulsos foram emitidos numa taxa de 2 kHz. Os dados medidos das duas estações de medição foram adquiridos simultaneamente. No pós-processamento utilizou-se a rotina *medifilt2* do Matlab configurada para reordenar uma matriz de 3 x 3 pixels. A velocidade foi estimada através do ponto da abscissa correspondente ao maior pico no espectro da velocidade. O perfil de velocidade foi obtido para as seguintes velocidades médias: 0,5 m/s, 0,7 m/s e 1,0 m/s. O escoamento foi considerado simétrico em relação ao eixo da tubulação, portanto somente metade do perfil da velocidade foi estimado. Segundo Takeda (2012) o feixe ultrassônico diverge ao longo da sua propagação, provocando um aumento do volume de medição e no erro da medição de velocidade. Para evitar esse efeito somente o perfil mais próximo do transdutor foi considerado, ou seja, da parede do tubo até o eixo de simetria. Essa parte da linha de medição está sujeita a vários ecos indesejáveis devido às reflexões na parede do tubo. Para que a medição não fosse prejudicada foi utilizado o filtro de ecos estacionários proposto por Hoeks et al. (1991).



### 4.2.3 Análise da acurácia

Da mesma forma que no ensaio do cilindro, foi calculado os momentos do perfil, através da equação (87), para analisar a acurácia do formato da variação espacial da velocidade medida. Como a medição foi restrita a metade do perfil, somente os momentos de ordem zero ( $M_0$ ) e de segunda ( $M_2$ ) e quarta ordem ( $M_4$ ) puderam ser calculados. Além desses parâmetros de forma, a velocidade máxima do perfil ( $r = R$ ) também foi medida e comparada com o valor do modelo teórico.

### 4.2.4 Resultados

A Tabela 4 e a Tabela 5 resumem os resultados dos erros dos parâmetros de forma para a estação de medição 1 e 2. Para 0,5 m/s e 0,7 m/s a velocidade média,  $M_0$ , obtida pelo transdutor de duplo elemento apresentou um erro menor que a obtida pelo de elemento único. A razão para isso pode ser percebida analisando o gráfico da Figura 41. O perfil da velocidade estimado para o transdutor de duplo elemento apresenta uma ondulação sobre o perfil do modelo teórico. Essa flutuação faz uma compensação dos erros do perfil, resultando numa área,  $M_0$ , mais próxima da área do modelo teórico. Já no perfil do elemento único (Figura 41) essa flutuação não é percebida.

**Tabela 4 – Erro relativo dos momentos para o escoamento horizontal (duplo elemento)**

$J_L$ (m/s)	Erro relativo	Erro relativo	Erro relativo	Erro relativo
	$M_0$ (%)	$M_2$ (%)	$M_4$ (%)	$U_{max}$ (%)
0,5	0,39	-2,52	-5,06	-0,17
0,7	0,26	-2,01	-4,06	-1,05
1,0	-2,24	-4,61	-6,71	-3,06

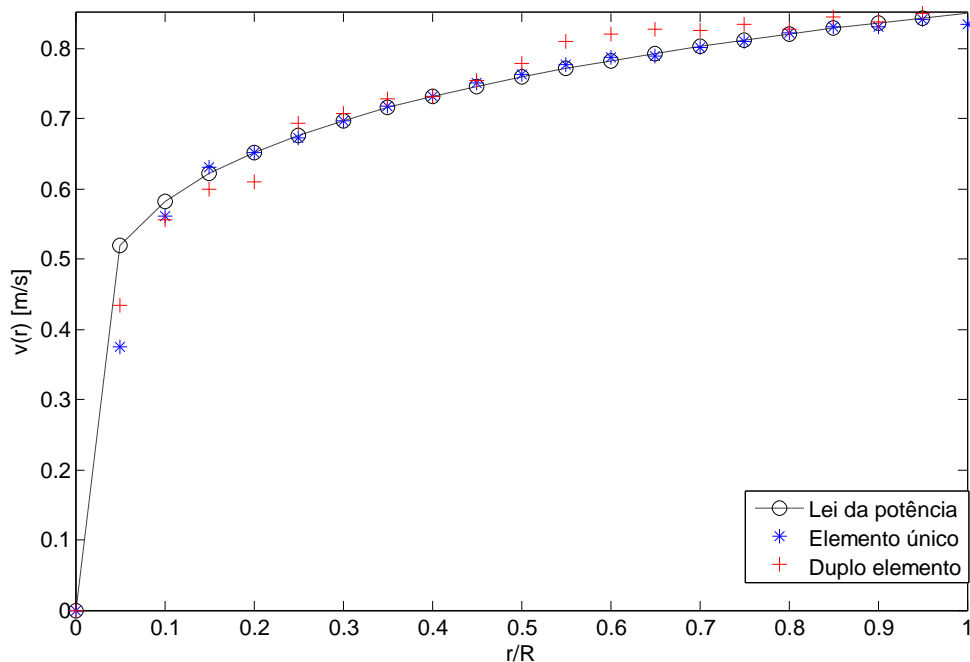
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 5 – Erro relativo dos momentos para o escoamento horizontal (elemento único)**

$J_L$ (m/s)	Erro relativo		Erro relativo		Erro relativo	
	$M_0$ (%)	$M_2$ (%)	$M_4$ (%)	$U_{max}$ (%)		
0,5	1,30	-2,49	-5,86			3,21
0,7	-0,82	-3,77	-6,54			-0,53
1,0	-1,06	-4,60	-7,53			-0,51

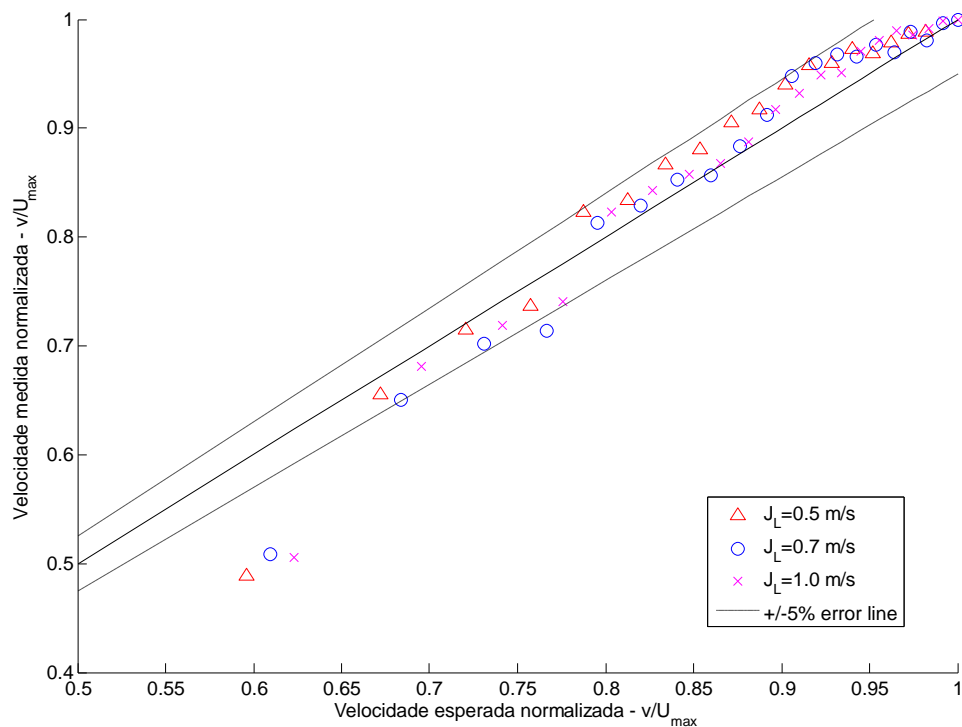
**Fonte: Autoria própria.**

A ondulação nos valores medidos pelo transdutor de duplo elemento pode ser percebida também no gráfico que relaciona a velocidade esperada pelo modelo teórico e a velocidade medida, Figura 42. Pode-se notar que a ondulação se repete para as outras velocidades superficiais testadas. Além disso, o valores medidos para o transdutor de duplo elemento perto da parede do tubo tendem a ser menores que a lei de potência, enquanto que os valores próximos as centro são tendem a ser maiores que o modelo teórico.



**Figura 41 – Comparação do perfil da velocidade medido para teórico ( $J_L=0,7$  m/s).**

**Fonte: Autoria própria.**



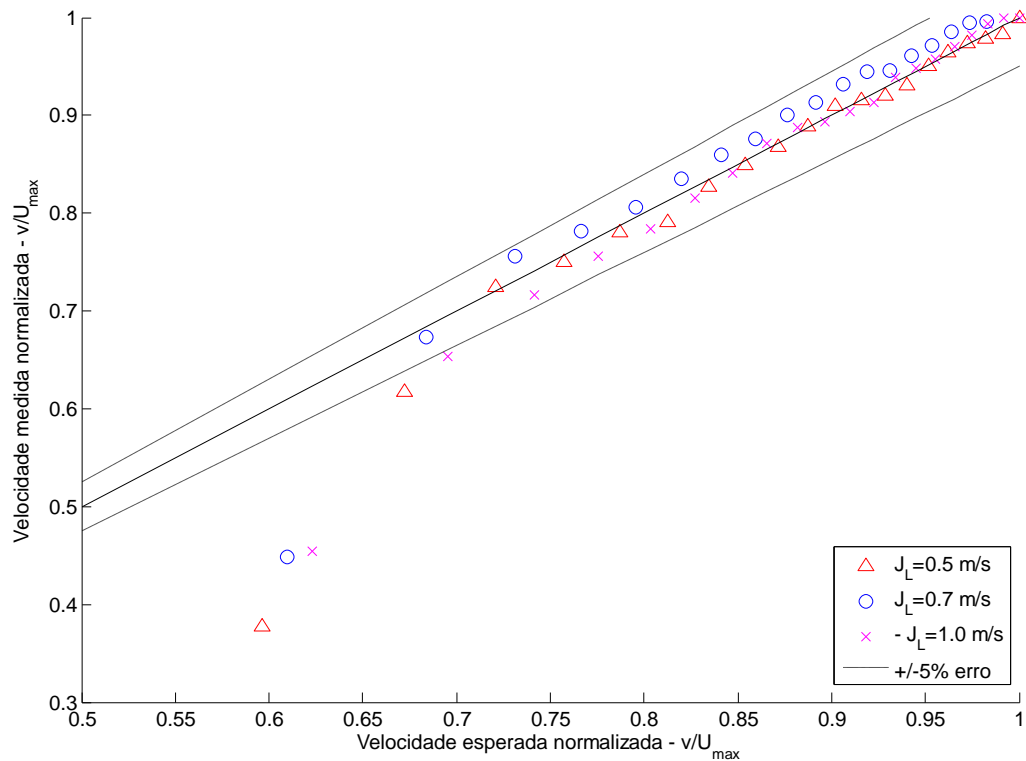
**Figura 42 – Velocidade esperada normalizada pela máxima velocidade versus velocidade medida normalizada pela máxima velocidade para o transdutor de duplo elemento.**

**Fonte: Autoria própria.**

A distribuição de velocidades medidas usando o transdutor de elemento único não apresenta ondulação no gráfico da velocidade esperada com a medida, Figura 43. E pode-se notar que os pontos apresentam um comportamento que tende muito mais para o modelo teórico.

Essa diferença de reprodutibilidade de perfil entre os dois transdutores pode ser devido ao acoplamento entre transdutor e tubo. O acoplamento por meio de uma cunha de acrílico utilizado no transdutor de duplo elemento produz ecos de maior intensidade em relação ao acoplamento por água utilizado no transdutor de elemento único. Esses ecos estacionários de alta energia precisam ser eliminados com auxílio de filtros. O efeito colateral de utilização do filtro de ecos estacionários é reduzir o valor das velocidades medidas nas áreas onde os ecos das interfaces estão presentes.

Tanto na Figura 42 quanto na Figura 43 maior parte dos pontos cai dentro da faixa de erro de 5%. Os pontos de velocidade que se distanciam muito do modelo teórico pertencem a valores medidos em  $r/R < 0,04$ , limiar onde a lei de potência não é aplicável (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2006).



**Figura 43 – Velocidade esperada normalizada pela máxima velocidade versus velocidade medida normalizada pela máxima velocidade para o transdutor de elemento único.**

**Fonte: Autoria própria.**

O erro médio quadrático (MSE) de reprodução do perfil teórico também foi calculado para os perfis de velocidades medidos. Analisando os resultados obtidos dispostos na Tabela 6, pode-se observar que o transdutor de duplo elemento apresenta os maiores valores de erro. Realizando a média dos erros médios quadráticos para as três velocidades medidas, o duplo elemento apresentou o valor médio de MSE cerca de duas vezes maior que a média para o elemento único. Essa diferença reforça os resultados anteriores, indicando que o perfil de velocidade do duplo elemento é menos acurado que o perfil de velocidade obtido usando o transdutor de elemento único.

**Tabela 6 – Comparação do erro médio quadrático(MSE)**

Transdutor	MSE para $v=0,5$ m/s	MSE para $v=0,7$ m/s	MSE para $v=1,0$ m/s	Média
<i>Elemento único</i>	$2,79 \cdot 10^{-4}$	$0,50 \cdot 10^{-4}$	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$2,01 \cdot 10^{-4}$
<i>Duplo Elemento</i>	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$5,01 \cdot 10^{-4}$	$5,30 \cdot 10^{-4}$	$4,19 \cdot 10^{-4}$

**Fonte: Autoria própria.**

### 4.3 ASCENSÃO LIVRE DE BOLHAS EM LÍQUIDO ESTAGNADO<sup>3</sup>

Bolhas ascendendo em líquido estagnado experimentam uma incessante mudança na inclinação da sua interface, devido às deformações que a bolha sofre no seu movimento oscilatório de subida. Tal fato torna esse tipo de escoamento extremamente complexo para detecção através das técnicas de intensidade de eco (MURAI, 2010).

#### 4.3.1 Detecção da interface líquido-gás

Quando a técnica VMS é aplicada a um escoamento gás-líquido, e como as ondas de ultrassom sofrem reflexão quase total na interface, ecos recebidos da fronteira ar-água apresentarão grandes amplitudes e, portanto resultarão em espectro de velocidade com alta energia. Assim, a posição da interface pode ser determinada analisando os dados provenientes do espectro de velocidades estimados. Nesse contexto é que se baseia a técnica proposta que é a principal contribuição desta Tese. Como se baseia na distribuição das velocidades, a técnica foi denominada de *Velocity Spectrum*, ou VS. Ela consiste em extrair parâmetros do formato da curva espectral da velocidade estimada para um intervalo de distância e de tempo considerado, formando um mapa espaço-temporal com o valor extraído. Estes dados de duas dimensões podem ser vistos como uma imagem e assim a interface das bolhas será caracterizada por pixels de alto brilho. Através da aplicação de um algoritmo de processamento de imagens de detecção de bordas, os pixels da interface podem ser detectados e dessa maneira a posição espaço-temporal da interface é encontrada.

---

<sup>3</sup> Partes do conteúdo desta seção foram originalmente publicados em Coutinho (2014a).

### 4.3.2 Parâmetros de formato do espectro

Para que a técnica VS possa ter bom desempenho é necessário selecionar corretamente o melhor parâmetro de formato do espectro que servirá de dado de entrada. Da curva espectral da velocidade é possível extrair uma grande quantidade de valores que estão relacionados com a forma da curva, entretanto, aquele que apresentar o maior desvio entre o valor obtido do espectro medido na fase líquida para o valor extraído do espectro medido na fase gasosa será o parâmetro que terá melhor desempenho de detecção na presença de ruídos

Como o pico do espectro da velocidade é utilizado para estimar a velocidade, ele será elencado como possível valor de entrada para a técnica VS. O quadrado do valor de pico do espectro está relacionado com a energia do espectro e também será estudado. Os demais parâmetros de formato serão extraídos dos momentos de ordem  $n$  do espectro de velocidade,

$$M_n = \int_{-\infty}^{+\infty} v^n f(v) d_v \quad (90)$$

que fornece um dado quantitativo sobre o formato da curva espectral, onde  $v$  é a velocidade e  $f(v)$  é o espectro de velocidades. Somente os 3 primeiros momentos serão utilizados porque o terceiro e quarto momento resultam em simetria e planificação do espectro que não são diretamente relacionados com a energia dos ecos. O momento de ordem zero,  $M_0$ , está relacionado com a energia do espectro. O momento de ordem 1,  $M_1$ , tem relação com a velocidade média, mas não resulta no valor dela diretamente, pois  $f(v)$  não está normalizado para preservar a energia absoluta do espectro. O momento de ordem 2,  $M_2$ , está indiretamente relacionado com a variância da distribuição espectral.

O parâmetro de entrada da técnica VS precisa ter uma alta relação sinal-ruído (SNR) para aumentar a acurácia e a probabilidade de detecção da posição da bolha. Todavia, obter o valor do SNR de uma imagem é ainda um problema aberto na área de processamento de imagem. O trabalho de Qin (2013) fornece uma estimativa do SNR através da relação entre a máxima e mínima variância local da imagem através de

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\max(\delta_I^2)}{\min(\delta_I^2)} \right), \quad (91)$$

onde  $\delta_I^2$  é a variância local da imagem  $I$  na posição  $(i, j)$ , definida como

$$\delta_I^2(i, j) = \frac{1}{(2p+1)(2q+1)} \sum_{k=-p}^p \sum_{l=-q}^q [I(i+k, j+l) - \mu_I(i, j)]^2, \quad (92)$$

sendo  $p$  e  $q$  o tamanho da matriz de pixels considerada,  $I$  é a imagem formada da distribuição espaço-temporal do parâmetro de formato considerado e  $\mu_I$  é a média local, dada por

$$\mu_I = \frac{1}{(2p+1)(2q+1)} \sum_{k=-p}^p \sum_{l=-q}^q I(i+k, j+l), \quad (93)$$

o tamanho da matriz de pixels utilizada será de  $p=2$  e  $q=2$  como sugerido em Qin (2013).

Contudo se for feito o cálculo do SNR, através da equação (91), para várias imagens construídas usando os parâmetros de formato descritos, os mesmos não poderão ser usados para comparação direta entre eles porque a energia dos sinais em cada imagem não está normalizada. Esse problema pode ser resolvido dividindo a imagem,  $I$ , em duas partes: uma contendo somente valores obtidos da fase líquida e outra somente com valores obtidos da fase líquida e gasosa. A primeira parte contém somente pixels causados por ecos de partículas no líquido. A segunda compreende pixels de ecos das bolhas mais pixels de ecos de partículas do líquido. Dividindo o SNR da segunda parte pela primeira, obtém a regra de decisão de formato ou SDR (*Shape Decision Rule*) expressa como

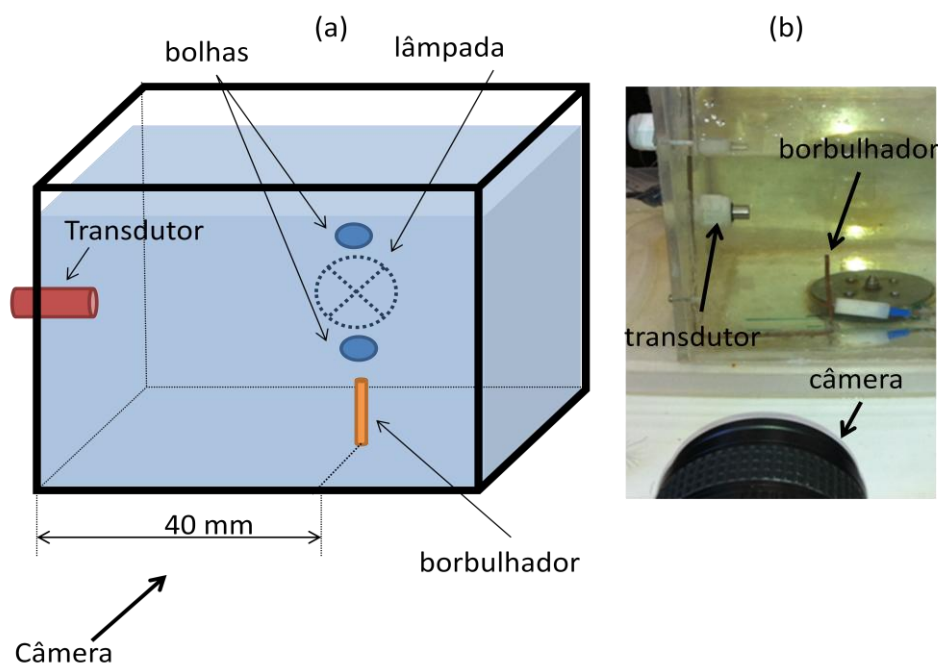
$$SDR = \frac{SNR(I(w, j))}{SNR(I(i, j))}, i = 1, 2, \dots, N_1, w = N_1 + 1, N_1 + 2, \dots, N, N_1 < N \text{ and } j = 1, 2, \dots, M \quad (94)$$

onde  $I$ , é a imagem formada pela distribuição espaço-temporal do parâmetro de formato considerado,  $N$  é o número total de pixels de distância,  $N_I$  é o número total de pixels que compreendem somente ecos de partículas e  $M$  é o número total de pixels temporais. Na configuração experimental, geração de bolhas ocorre numa região controlada e  $N_I$  é usualmente definido como  $N/2$ . Na equação(94), se nenhuma bolha estiver presente na imagem  $I$ , o valor do SNR do numerador será idealmente igual ao SNR do denominador resultando em SDR igual a 1. Quando bolhas estão presentes na imagem, SNR do numerador será maior que o SNR do denominador, resultando num SDR maior que 1, idealmente. Como as ondas de ultrassom sofrem atenuação com a distância é possível ter valores de SDR menores que 1, quando a divisão da imagem é entre ecos mais distantes por ecos mais próximos do transdutor. Entretanto valores muito menores que 1 indicam que não há bolhas presentes na imagem ou que o SNR é muito baixo para efetuar detecção.

#### 4.3.3 Montagem Experimental

Uma cuba de 19,1 cm de lado, que foi cheia de água mineral. Partículas com diâmetros de 80  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$  (SEM GRILTECH 1A P82) e 1,05  $\text{g}/\text{cm}^3$  foram adicionadas na água até atingir uma concentração de 4 g/l. Para gerar as bolhas, foi utilizado um cateter de cobre alinhado com um transdutor de ultrassom e afastado do mesmo cerca de 4 cm, como mostra a Figura 44-a. Uma filmadora de alta velocidade foi utilizada com o objetivo de visualizar o escoamento e verificar a posição espaço-temporal das bolhas (a Figura 44-b). O modelo escolhido para o experimento foi a câmera MotionPro X4, de marca RedLake, configurada para adquirir 250 quadros por segundo.





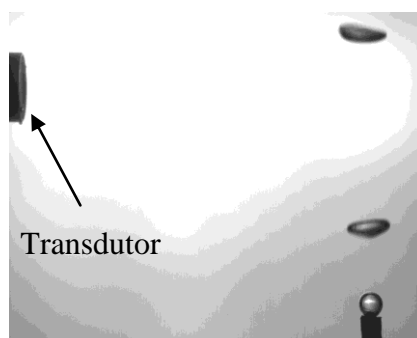
**Figura 44 – Montagem experimental da cuba com partículas. Em (a) o diagrama do experimento e em (b) uma foto do ponto de vista da câmera.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A câmera foi afastada o mínimo possível da cuba obtendo-se uma resolução de 45  $\mu\text{m}$  por pixel. Uma lâmpada halógena de 150 W foi posicionada na face oposta a da filmagem, para garantir uma iluminação adequada para câmera. Para não ofuscar a filmagem, foi utilizado um filme difusor entre a lâmpada e a cuba.

Para todos os experimentos de cuba, o transdutor de ultrassom foi montado horizontalmente para facilitar a sua instalação na cuba e eliminar a incerteza do ângulo de emissão, caso se utilizasse uma posição inclinada. Este posicionamento horizontal do transdutor fará com que ele somente meça a componente horizontal da velocidade das bolhas/partículas. Como as bolhas descrevem um movimento oscilatório, essa componente horizontal terá intensidade suficiente para aplicação da técnica de estimação de velocidade. A utilização de um transdutor com emissão inclinada deve resultar num desempenho similar, desde que a inclinação seja pequena o suficiente para permitir que os ecos das partículas/bolhas retornem para o diâmetro ativo do transdutor.

O transdutor de ultrassom utilizado foi o Metflow TX8-2.5-8, com frequência central de 8 MHz, diâmetro ativo de 2,5 mm e que emite 1 ciclo por disparo. O mesmo foi escolhido por proporcionar uma resolução axial de 187,5  $\mu\text{m}$ . O transdutor foi excitado a uma taxa de 2000 vezes por segundo com um pulso de tensão de 100 V.

O tubo utilizado para produzir as bolhas foi acoplado a uma bomba de aquário ajustando-a para gerar bolhas com diâmetro de esfera equivalente entre 2,5 mm a 3,5 mm. As imagens de 15 bolhas foram analisadas através de processamento de imagens chegando-se num diâmetro equivalente de esfera medido de 3 mm, na média (Figura 45).

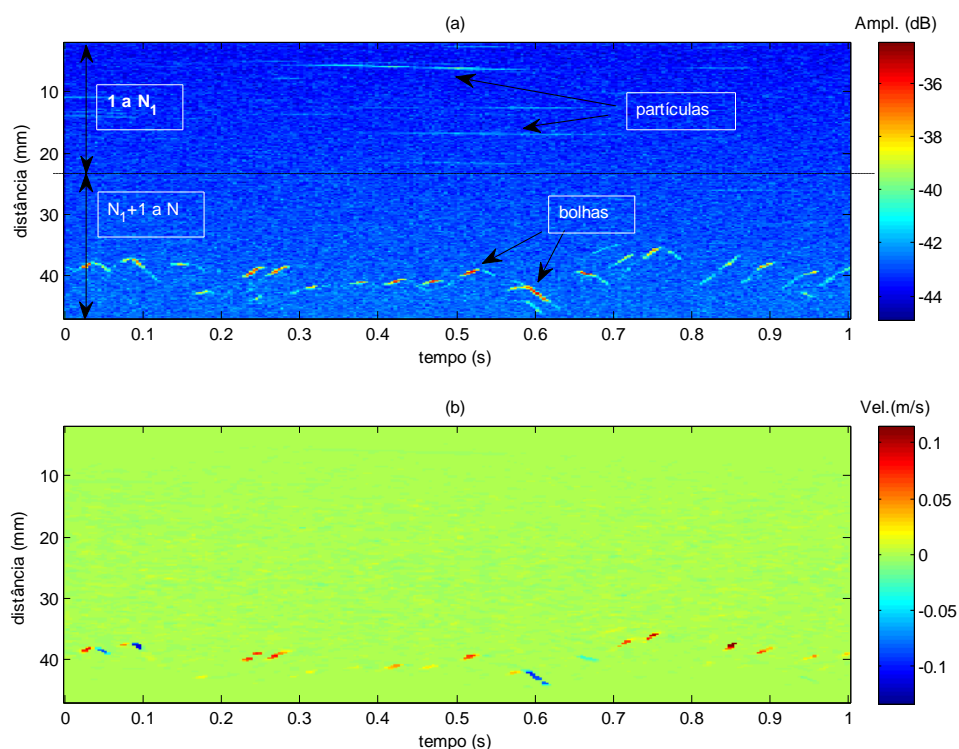


**Figura 45 – Amostra de imagem utilizada para estimar o tamanho das bolhas.**  
**Fonte: Autoria própria.**

O sistema de medição foi configurado para uma resolução espaço-temporal de 187,5  $\mu\text{m}$  e 8 ms. Para igualar o número de pontos de velocidade estimada com a taxa de quadros da câmera, os dados que entram no algoritmo de estimação de velocidade foram sobrepostos no eixo do tempo por um fator de 50%.

Para avaliar o desempenho dos parâmetros de formato da curva espectral, 264 bolhas foram injetadas na cuba correspondendo a 15 segundos de aquisição de dados. Os ecos recebidos foram amplificados em 20 dB, através de ajuste manual do gerador e receptor de pulsos de ultrassom.

A primeira etapa da técnica VS é construir um mapa espaço-temporal com os valores do parâmetro de formato obtidos da análise dos espectros de velocidade calculados. O parâmetro de formato é escolhido através da aplicação do critério SDR da equação (94). Para calcular o valor do SDR, os mapeamentos construídos foram divididos no eixo espacial em duas imagens, como mostra a Figura 46-a. Como a geração de bolhas ocorre a 40 mm de distância do transdutor, na primeira imagem (de 1 até  $N_1$ ), mesmo com o movimento oscilatório, nenhuma bolha irá cruzar o feixe de ultrassom até essa distância. Assim  $N_1$  pode ser escolhido como a metade da distância máxima adquirida (47 mm).



**Figura 46 – Mapeamentos do quadrado do valor de pico do espectro e velocidade. (a) A divisão do mapa espaço-temporal na metade da distância para o cálculo do SDR é mostrada para 1 segundo de aquisição dos dados. (b) O mapa espaço-temporal da velocidade correspondente a (a). Bolhas são caracterizadas pelos altos valores de velocidade (0,1 m/s e -0,1 m/s) e partículas próximas ao transdutor indicadas em (a) não podem ser vistas em (b) por apresentar velocidade nula.**

**Fonte: Autoria própria.**

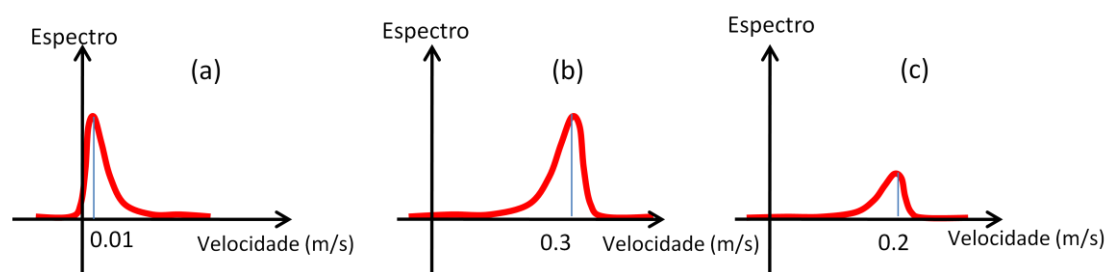
A Tabela 7 lista os valores calculados do SDR. Como o parâmetro  $M_1$  apresentou o maior valor, ele irá apresentar melhor desempenho na identificação da interface. O valor alto de  $M_0$  também indica que ele apresenta a maior relação sinal-ruído entre todos os parâmetros de formato. O valor específico de 1,53 mostra que a segunda parte da imagem construída de  $M_1$ , de  $N_1$  até  $N$ , onde as bolhas estão presentes, tem um SNR 53% maior a imagem que compreende somente líquido e partículas (de 1 até  $N_1$ ).

**Tabela 7 – Valor do SDR para os parâmetros de formato**

Parâmetro de Formato	SDR
<i>Pico do espectro</i>	1,36
<i>Quadrado do valor de pico</i>	1,42
$M_0$	1,35
$M_1$	1,53
$M_2$	1,37

**Fonte: Autoria própria.**

No experimento de ascensão de bolhas em líquido estagnado, partículas próximas ao transdutor causarão ecos de grande amplitude. Se a concentração de partículas for elevada, os ecos das partículas irão se superpor de forma a gerar amplitudes ainda mais elevadas. Entretanto, as partículas próximas ao transdutor experimentarão baixas velocidades devido a estarem muito longe da região de geração das bolhas, e isso implicará em um valor baixo de  $M_1$ , como na Figura 47-a. Bolhas distantes do transdutor irão gerar ecos de grande amplitude devido à diferença de impedância acústica entre ar e água e irão apresentar valores altos de velocidades, resultando um valor alto de  $M_1$ , conforme a Figura 47-b. Partículas próximas as bolhas que estão na esteira das bolhas irão apresentar alta velocidade, mas baixa energia de eco, Figura 47-c, implicando em um valor moderado de  $M_1$ . Dessa maneira, em condições de grande escorregamento de velocidade entre fases,  $M_1$  irá apresentar o melhor resultado no critério SDR. Já para situações de pequeno escorregamento entre velocidades,  $M_1$  pode não ter o mesmo desempenho. Nesta situação, a concentração de partículas pode ser reduzida, resultando em ecos de menor energia nas proximidades do transdutor. Existem estudos que mostram que a concentração da ordem de mg/l podem ser utilizadas sem comprometer a estimação da velocidades se a velocidade do escoamento for suficientemente alta (TAKEDA,2012). Os parâmetros do quadrado do pico e o pico do espectro não são afetados pela diferença de velocidade entre fases devido a eles não serem ponderados pelas velocidades como acontece com os momentos. Assim, é esperado que esses parâmetros apresentem melhor desempenho de detecção do que os demais, numa condição de baixo escorregamento.



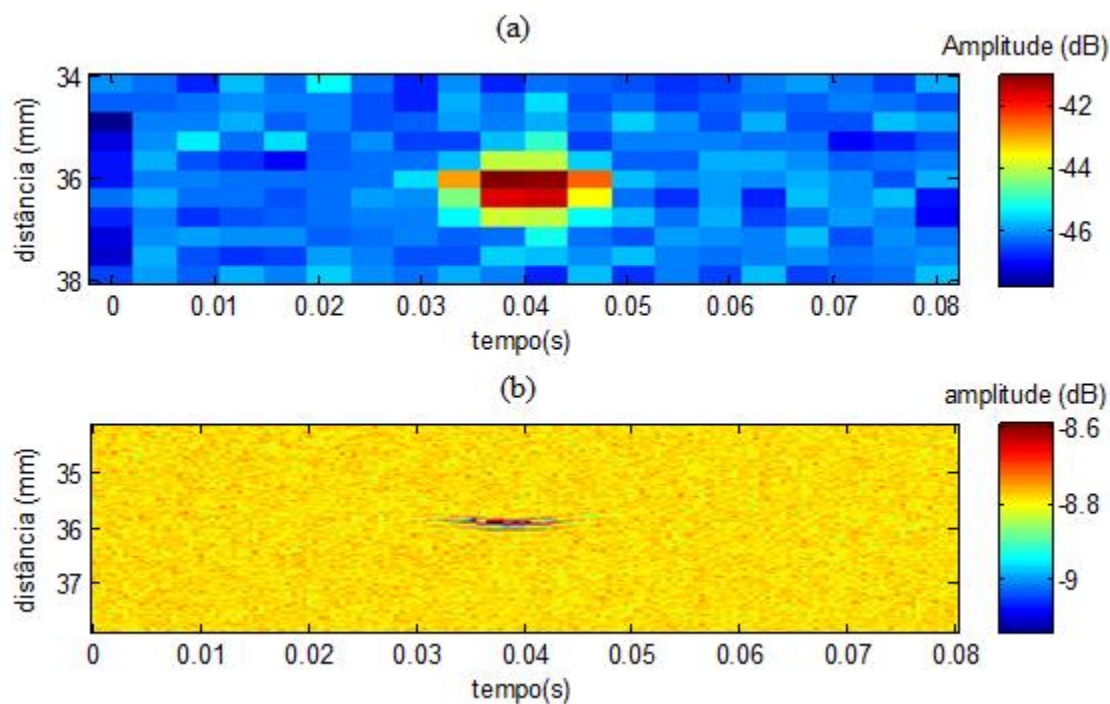
**Figura 47 – Exemplo de espectros de velocidades obtidos na ascensão de bolhas. (a) Espectro para partículas muito próximas ao transdutor, (b) espectro de velocidade das bolhas e (c) espectro de velocidades para partículas na região de geração das bolhas.**

**Fonte: Autoria própria.**

Todavia, devido a alta concentração de partículas utilizada (4 g/l), os valores de  $M_1$  de regiões próximas ao transdutor serão altos e podem levar a uma falsa detecção de interface.

Portanto, a tarefa de detectar a interface das bolhas torna-se ainda mais difícil. Neste cenário de alta concentração, os ecos das partículas podem ser eliminados pela multiplicação da velocidade estimada em cada ponto espaço-temporal pelo valor correspondente do parâmetro utilizado, nesse caso  $M_1$ . A Figura 46-b apresenta uma amostra do mapa de velocidades obtido para 1 segundo de aquisição de dados, onde a velocidade foi estimado pelo pico de maior amplitude do espectro. Como a maior parte do líquido não se movimenta muitos pontos do mapa apresentarão valores nulos com exceção daqueles próximos à interface da bolha, onde a velocidade será alta (Figura 46-b). Então, essa operação de multiplicação funciona como um filtro que dá ênfase somente nos pontos próximos a interface líquido-gás. Este procedimento será referenciado como filtragem por velocidade. Essa situação pode ser evitada se a concentração de partículas puder ser reduzida, o que irá tornar os ecos das partículas mais fracos (no experimento foi utilizada uma concentração alta de partículas – 4g/l – de forma intencional para testar o pior caso de aplicação da técnica).

Uma amostra do mapa construído com  $M_1$  está ilustrada na Figura 48-a para a ascensão de uma bolha. A imagem da intensidade do eco correspondente, Figura 48-b, fornece uma melhor resolução espacial, portanto será mais acurada toda vez que uma bolha for detectada. Entretanto, numa situação de baixo SNR, selecionar um valor de limiar de detecção de bolhas é uma tarefa complexa porque um valor alto pode resultar em perda de detecção de bolhas e um valor muito baixo em falsos positivos. A técnica VS aumenta a diferença de amplitude da bolha para o restante dos pontos o que facilita a seleção do limiar propiciando uma detecção mais confiável com o custo da diminuição da resolução. Isso pode ser notado na Figura 48-a onde a interface gás-líquido é caracterizada por valores aproximadamente 3 dB maiores que restante dos pontos. Já para o mapeamento da intensidade dos ecos, Figura 48-b, menos de 0,5 dB de diferença é atingido. Portanto é esperado que o uso do primeiro seja mais eficiente que o último para detecção de bolhas.



**Figura 48 – Comparação entre mapa gerado com  $M_1$  e mapa de intensidade do eco. Em (a) o mapa espaço-temporal construído com  $M_1$  mostra o distúrbio causa pela passagem de uma bolha. Em (b) o mapa espaço-temporal da intensidade de eco correspondente ao mesmo intervalo de espaço-tempo.  
Fonte: Autoria própria.**

A distribuição do primeiro momento ( $M_1$ ) depois da filtragem de velocidade pode ser tratada como uma imagem, permitindo assim o uso de técnicas de processamento de imagens. Para detecção de bordas, o primeiro passo é aplicar um filtro espacial que irá enfatizar o contorno da bolha. Como existem vários tipos de filtros que podem ser utilizados, testes foram realizados para auxiliar na escolha do filtro mais apropriado. Os filtros estudados estão listados na Tabela 8. O método analítico proposto por Canny(1986) foi também testado pelo seu bom desempenho para detecção de bordas em imagens com baixo SNR. Os filtros foram aplicados a blocos consecutivos de dados compreendendo 1 segundo de aquisição.

**Tabela 8 – Lista dos filtros espaciais estudados.**

Filtro	Matriz
<i>Sem filtro</i>	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
<i>Sobel</i>	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
<i>Prewitt</i>	$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
<i>Frei-Chen</i>	$\frac{1}{2+\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{2} \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
<i>Roberts</i>	$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
<i>Separated Pixel Difference</i>	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

**Fonte: Autoria própria.**

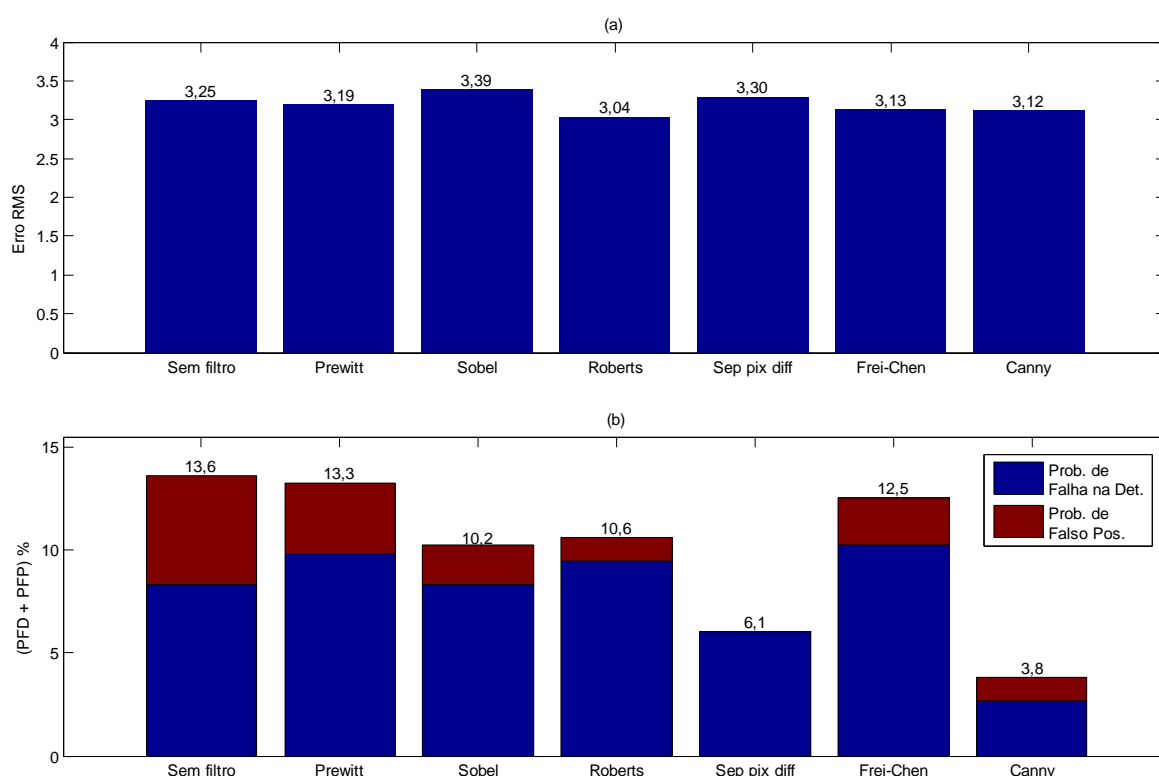
Para quantificar a acurácia da detecção, o erro RMS na detecção da posição espaço-temporal foi calculado, definido como (MURAI et al.,2010):

$$E_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{\delta_x}{\Delta_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta_t}{\Delta_t}\right)^2} \quad (95)$$

onde  $\delta_x$  e  $\delta_t$  são os erros espacial e temporal respectivamente, e os denominadores  $\Delta_x$  e  $\Delta_t$  são as resoluções espacial e temporal configuradas no sistema de medição. Notando que o erro espacial só é computado quando o algoritmo de processamento de imagens da câmera e a técnica proposta detectam a presença da bolha. Quando o processamento de imagem detecta uma bolha e a técnica VS não detecta, ou vice-versa é computado um erro no tempo.

A mesma configuração experimental usada para testar os parâmetros de formato do espectro foi também utilizada para estudar o erro de detecção através da passagem de 264 bolhas. Através de processamento das imagens obtidas da câmera de alta velocidade, a posição relativa da interface líquido-gás foi determinada e utilizada como valor de referência no cálculo do erro.

As bolhas podem não ser detectadas quando as mesmas não produzem um valor de pico significativo. Assim um indicador de probabilidade de falha na detecção (PFD) foi calculado para quantificar esse problema. Bolhas que contornam o feixe do transdutor não são incluídas no cálculo do PFD. Se o nível de ruído num grupo de pixels exceder o limiar uma detecção incorreta de interface pode ocorrer, dessa forma o indicador probabilidade falso positivo (PFP) será também calculado. Como ambas as probabilidades afetam a acurácia, o valor delas obtido depois da aplicação dos filtros, será somado para permitir uma comparação mais justa de desempenho. Os resultados obtidos estão dispostos na Figura 49.



**Figura 49 – Resultados de desempenho para os filtros selecionados. (a) Resultados do Erro RMS. (b) Resultados da probabilidade de falha na detecção e falso positivo.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Analisando a Figura 49 fica claro o benefício da utilização dos filtros espaciais. Se não for utilizada a filtragem, ruídos de baixa frequência combinados com uma pequena diferença de valores entre pontos de interface e o pontos do líquido aumenta muito a detecção de falsas bolhas. Diminuindo o limiar para reduzir PFP irá implicar num aumento da probabilidade de falha na detecção. O filtro de Canny apresentou o melhor resultado dentre os outros para o

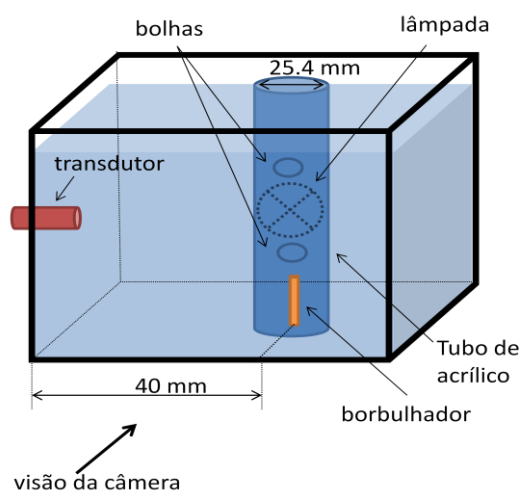


experimento realizado. Isso ocorre porque o algoritmo de Canny analisa os dados de entrada e se adapta a eles de forma a obter o melhor resultado de detecção de bordas

#### 4.3.4 Influência da tubulação de acrílico

Tubulações de acrílico são empregadas em muitas plantas industriais e de pesquisa devido a sua resistência e transparência. Estas propriedades permitem que sejam utilizadas desde pressões baixas a moderadas e favorecem a utilização de técnicas ópticas como a filmagem de alta velocidade.

O objetivo desse experimento é descobrir se a presente técnica irá manter um bom desempenho na presença de um tubo de acrílico entre transdutor e escoamento. Para simular essa situação, um tubo de acrílico com 25,4 mm de diâmetro interno foi utilizado e montado conforme a Figura 50.



**Figura 50 – Diagrama do experimento de ascensão de bolhas em tubo de acrílico.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A cuba foi preenchida com água mineral. Partículas de 80  $\mu\text{m}$  to 200  $\mu\text{m}$  (EMS GRILTECH 1A P82), com 1,05  $\text{g}/\text{cm}^3$  foram adicionadas a água até atingir a concentração de 4  $\text{g}/\text{l}$ . A filmagem de alta velocidade foi realizada numa taxa de 250 quadros/s e com uma resolução de 50  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ . Foi utilizado um transdutor de 8 MHz, 1 ciclo e com 2,5 mm de diâmetro ativo. As bolhas geradas tinha 3 mm de diâmetro equivalente de esfera. O sistema de

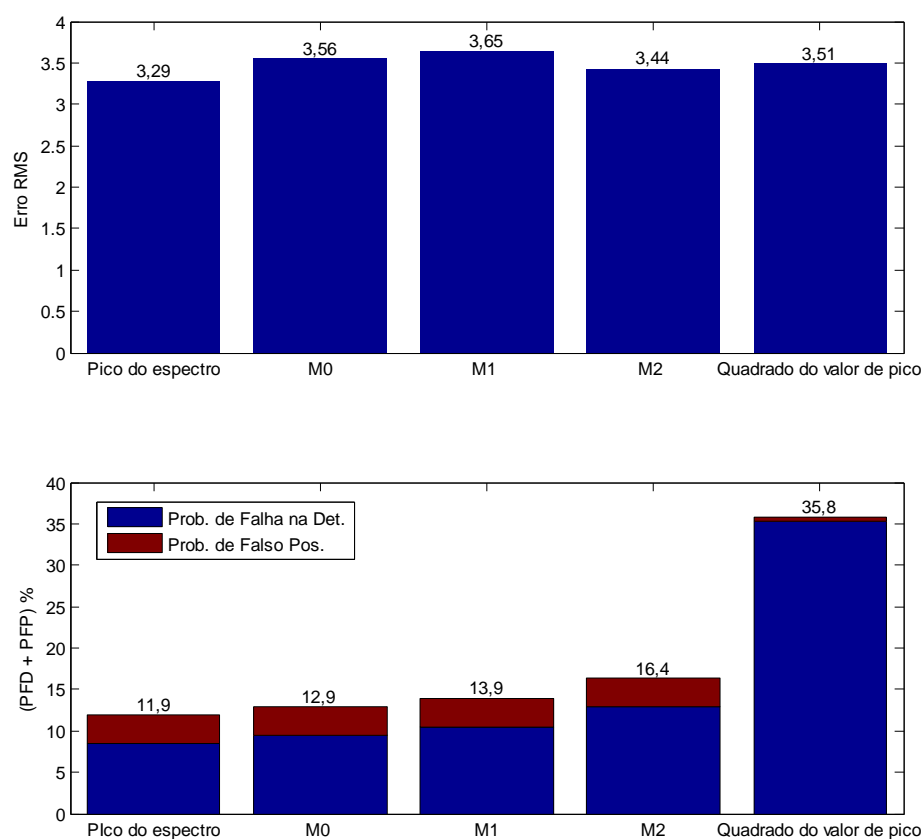
medição foi configurado para uma resolução espaço-temporal de 187  $\mu\text{m}$  por 8 ms com 50% sobreposição na dimensão do tempo. O ganho do gerador e receptor de pulsos de ultrassom foi ajustado para +40 dB.

Como realizado no experimento sem tubo, primeiro foi investigado qual o parâmetro de formato seria mais adequado. A intenção é verificar se os resultados obtidos anteriormente seriam mantidos. Os resultados do SDR apresentados na Tabela 9 apresentam muita pouca diferença de valores entre eles. Deve-se levar em conta que o método da variância local para cálculo do valor do SNR é apenas uma estimativa do valor real do SNR. Devido à dificuldade na escolha do SDR, o erro RMS e as probabilidades foram contabilizados para cada parâmetro da Tabela 9. Um total de 201 bolhas foram geradas durante o teste. Detecção de bordas foi realizada pelo método de Canny. Análise dos resultados da Figura 51 mostra que, com exceção do quadrado do valor de pico do espectro, os demais parâmetros apresentaram desempenho muito similar, sendo que dentre eles o pico do espectro apresentou um desempenho de detecção um pouco melhor. Cabe ressaltar que o fato do erro RMS do quadrado do valor de pico ter sido relativamente baixo (3,51) apesar de apresentar probabilidade de falha na detecção alta (35,8%) se deve ao método do cálculo do erro RMS que só computa valores quando ocorre uma detecção. Comparando os resultados com o de ascensão de bolhas sem a interferência do tubo (Figura 49), o erro RMS apresentou um pequeno aumento no valor. Entretanto, a probabilidade combinada (PFD+PFP) aumentou consideravelmente indicando que as paredes do tubo têm influência direta na detecção da interface.

**Tabela 9 – Valor do SDR para experimento com tubo**

Parâmetro de Formato	SDR
<i>Pico do espectro</i>	1,03
<i>Quadrado do valor de pico</i>	1,05
$M_0$	1,06
$M_1$	0,97
$M_2$	1,04

**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 51 – Resultados de desempenho dos parâmetros de formato em tubo de acrílico.**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.3.5 Sem a utilização de partículas

Baseado no fato que o método proposto detecta a interface analisando a energia do espectro de velocidades, o qual depende somente dos ecos das bolhas, é esperado que a técnica VS não demande a presença de partículas. O objetivo desse estudo é verificar se a técnica desenvolvida pode ser aplicada a essa situação ou se algum tipo de modificação deve ser implementada para detectar a interface com exatidão.

Para essa condição, foi utilizada a mesma configuração experimental da Figura 44, contudo sem o acréscimo de partículas. A filmagem de alta velocidade foi realizada numa taxa de 250 quadros/s e com uma resolução de 45  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ . Um transdutor de 8 MHz, 1 ciclo

e com 2,5 mm de diâmetro ativo foi utilizado. O sistema de medição foi configurado para uma resolução espaço-temporal de 187,5  $\mu\text{m}$  por 8 ms com 50% sobreposição na dimensão do tempo. O ganho do gerador e receptor de pulsos de ultrassom foi ajustado para 0 dB.

Novamente, os parâmetros de formato do espectro foram investigados e cada valor SDR computado. Analisando os valores da Tabela 10 pode-se observar que o primeiro momento,  $M_1$ , e o pico do espectro apresentam valores muito próximos e merecem ser investigados mais a fundo. Assim posto, foi realizado a passagem de 115 bolhas e a acurácia da detecção foi avaliada para esses dois parâmetros. Resultados para utilização de  $M_1$  e do pico do espectro estão resumidos na Tabela 11. O erro RMS apresenta pouca diferença entre eles, entretanto  $M_1$  apresenta uma chance maior que o dobro de falha na detecção da bolha que o pico do espectro. É notável que os resultados de acurácia para esse experimento eram esperados que fossem bem melhores que o dos experimentos anteriores devido à falta das partículas, pois a presença das mesmas diminui a relação sinal-ruído.

**Tabela 10 – Valor do SDR para experimento sem partículas**

Parâmetro de Formato	SDR
<i>Pico do espectro</i>	0,97
<i>Quadrado do valor de pico</i>	0,85
$M_0$	0,78
$M_1$	0,99
$M_2$	0,72

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 11 – Resultados da acurácia da detecção sem partículas**

Parâmetro de Formato	Erro RMS	PFD %	PPF %
<i>Pico do espectro</i>	1,71	0,87	0
$M_1$	1,61	2,6	0

Fonte: Autoria própria.

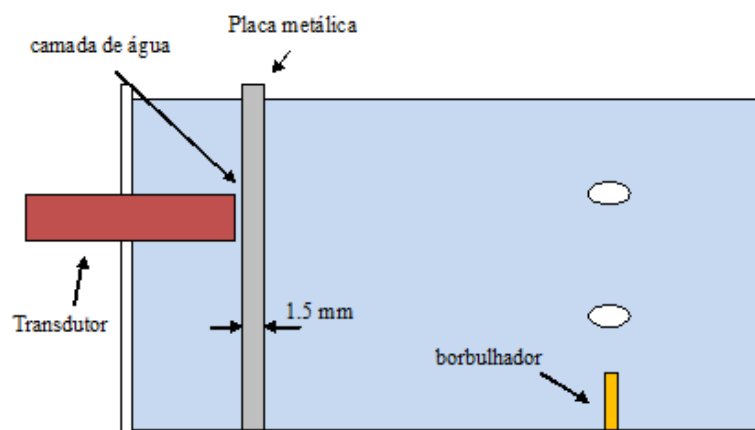
#### 4.3.6 Influência de parede metálica

Plantas industriais geralmente demandam tubulação de material metálico para suportar escoamentos de alta pressão. Nesse caso, a característica não intrusiva das técnicas ultrassônicas se torna ainda mais atrativa. Todavia, a propagação de ondas de ultrassom no metal apresenta algumas dificuldades. Devido ao descasamento de impedância acústica entre

metal e água, o acoplamento do transdutor de ultrassom com a tubulação de metal pode resultar em perdas na energia do sinal. Se a relação entre a espessura da parede e o comprimento de onda for diferente de  $n/2$ , com  $n=1,2,3,\dots$ , um efeito de ressonância ocorre que implicará em grande atenuação do sinal (WADA et al., 2002).

Um experimento usando a mesma cuba preenchida de água mineral e sem adição de partículas foi montado, com a inclusão de uma placa metálica de 1,5 mm de espessura obstruindo a saída do transdutor de ultrassom como mostra a Figura 52. Neste caso foi necessário ajustar um ganho de 16 dB no gerador e receptor de pulsos de ultrassom. Filmagem foi realizada numa taxa de 250 quadros/s e com 53  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  de resolução. Um transdutor de 8 MHz, 1 ciclo e com 2,5 mm de diâmetro ativo foi utilizado. O sistema de medição foi configurado para uma resolução espaço-temporal de 187,5  $\mu\text{m}$  por 8 ms com 50% sobreposição na dimensão do tempo.

Com essa mudança no experimento, os parâmetros de formato foram novamente investigados e tem seus valores discriminados na Tabela 12.



**Figura 52 – Configuração experimental para ascensão de bolhas com placa metálica.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 12 – Valor do SDR para experimento com placa metálica**

Parâmetro de Formato	SDR
<i>Pico do espectro</i>	1,82
<i>Quadrado do valor de pico</i>	1,83
$M_0$	1,23
$M_1$	1,70
$M_2$	1,08

**Fonte: Autoria própria.**

O quadrado do valor de pico mostrou o maior valor de SDR (Tabela 12), mas nesse caso foi feita uma investigação se a combinação de dois parâmetros de formato poderia melhorar ainda mais os resultados de acurácia. Como o quadrado do valor de pico superou os demais, combinou-se ele com cada um dos 5 parâmetros restantes através de multiplicação ponto a ponto. Para o cálculo dos erros e probabilidades, foram geradas 246 bolhas. A melhor combinação foi o pico do espectro com o momento de ordem zero ( $M_0$ ). Na Tabela 13, o quadrado do valor de pico ponderado por  $M_0$  mostrou uma redução significativa no erro RMS comparado a utilizar somente o quadrado do valor de pico. A probabilidade de falso positivo (PFP) reduz com o custo do aumento na probabilidade de falha na detecção (PFD). No entanto, se for comparado a contribuição somada das duas (PFD+PFP) o parâmetro ponderado apresenta melhor desempenho (PFD+PFP=5,3%) do que a versão não ponderada (PFD+PFP=6,1%). Como o pico do espectro teve um valor muito próximo ao do quadrado do pico (Tabela 12), o seu desempenho de detecção também foi avaliado incluindo a ponderação dele por  $M_0$  e está mostrado na Tabela 13. Usando somente o valor de pico não é suficiente para o algoritmo de detecção de bordas, baseado no método Canny, estabelecer um limiar de detecção, desta forma ele acaba estabelecendo um limiar muito baixo o que resulta em detectar a interface continuamente o que resulta em um alto valor de erro RMS (Tabela 13).

**Tabela 13 – Resultados da acurácia da detecção com placa metálica**

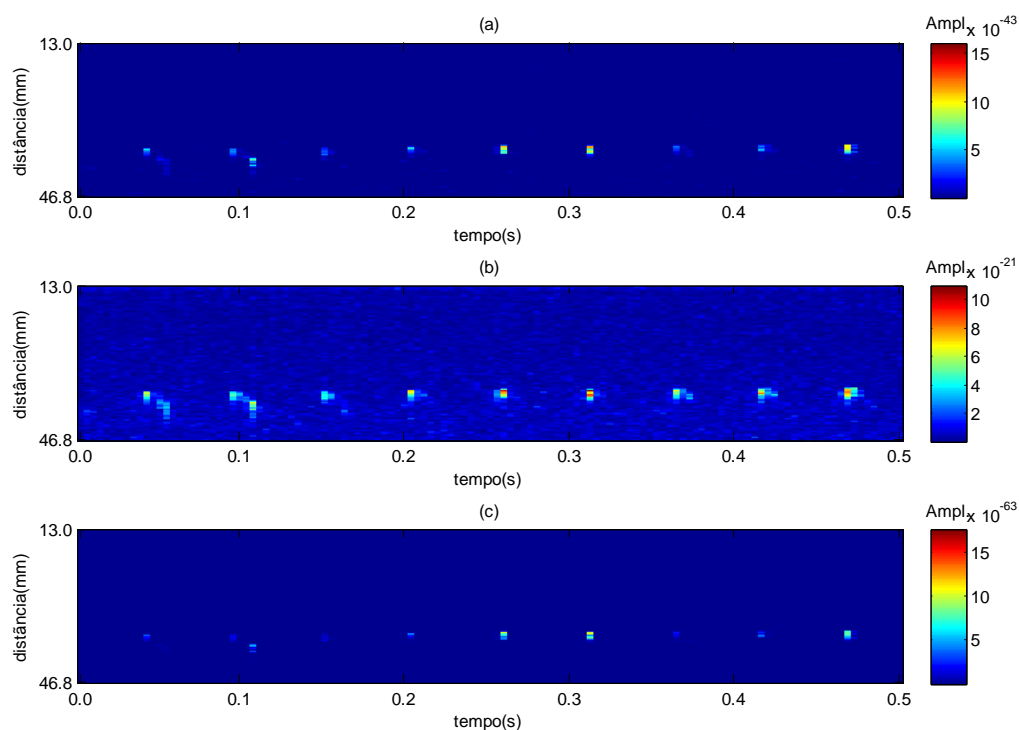
Parâmetro de Formato	Erro RMS	PFD %	PFP %
<i>Quadrado do valor de pico</i>	8,64	4,9	1,2
<i>Quadrado do valor de pico x <math>M_0</math></i>	3,39	0,4	4,9
<i>Pico do espectro</i>	59,49	0	0,8
<i>Pico do espectro x <math>M_0</math></i>	9,63	1,2	4,9

**Fonte: Autoria própria.**

Esta ponderação ou filtragem entre dois parâmetros de formato também foi testada nos experimentos anteriores para determinar se poderia aumentar o desempenho de detecção, mas somente apresentou bons resultados no caso de acoplamento metálico.

Para entender o efeito que ocorre quando se combina o pico do espectro com o momento de ordem zero, o mapa espaço-temporal dos dois parâmetros foi comparado com o mapa dos dois parâmetros combinados. Na Figura 53-a os valores de amplitudes altos são mais espalhados envolta da interface da bolha o que dificulta a detecção das bordas com confiabilidade. Ponderando a Figura 53-a com a Figura 53-b, através da multiplicação ponto a

ponto, a Figura 53-c é obtida, onde o espalhamento de valores envolta da interface foi consideravelmente reduzido. Desta maneira o algoritmo de detecção de bordas de Canny consegue melhorar seu desempenho, o que explica os resultados obtidos na Tabela 13.



**Figura 53 – Comparação de mapas espaço-temporal para 0,5 segundos de aquisição. (a) Mapa do pico do espectro. (b) Mapa do momento de ordem zero ( $M_0$ ). (c) Mapa da multiplicação ponto a ponto dos dois primeiros.**

**Fonte: Autoria própria.**

## 5 CONCLUSÕES

Um sistema de medição do perfil espacial de velocidades para escoamentos através de instrumentação ultrassônica pulsada e que utiliza o algoritmo de estimação VMS foi implementado. O mesmo foi validado através de um escoamento de cilindro girante apresentando um erro entre 0,94% a 1,61% na medição da velocidade média de rotação. Quanto à acurácia de reprodutibilidade do perfil, apresentou erro de simetria de no máximo de 0,81%, quanto a planificação do perfil o erro ficou estável em cerca de 5,5%, na simetria o erro não foi maior que 0,81% e o erro da variância entre 3,6 e 3,8% aproximadamente.

O perfil de velocidade de um escoamento horizontal monofásico turbulento também foi medido para fins de validação do sistema. O experimento teve como objetivo secundário verificar a possibilidade de utilizar transdutores de duplo elemento para estimação de velocidade. Para a medição da velocidade média obteve-se erro máximo de -2,24% e -1,06% para os transdutores de duplo elemento e elemento único, respectivamente. Na medição da velocidade máxima do perfil ambos apresentaram um erro máximo de cerca de 3%. Mostrou-se que para a reprodutibilidade do perfil ambos apresentaram erro menor que 5%, entretanto o transdutor de duplo elemento teve uma grande flutuação nos valores do perfil de velocidade se comparado ao de elemento único.

além de apresentar erro RMS menor que a metade do erro apresentado pela técnica Doppler Local introduzida por Murai et al. (2010).

Um novo método ultrassônico para detecção da interface água-ar, também denominado de técnica VS, foi proposto. Foi mostrado que a nova técnica tem potencial de desempenhar melhor que a intensidade do eco, em termos de detecção de fase, pois apresenta uma maior diferença de valores de amplitude da bolha para os restante dos pontos. Mostrou-se que a técnica VS pode ser aplicada ao escoamento de ascensão de bolhas em líquido estagnado com partículas usando o momento de primeira ordem,  $M_1$ , filtrado pela velocidade medida. Essa combinação de velocidade com  $M_1$  resultou num erro RMS na detecção da posição espaço-temporal de 3,1. Além disso, a técnica proposta apresentou probabilidade de falha de detecção e de falsa detecção (PFD+PFP) de 3,8% que é cerca da metade da probabilidade de falha de detecção reportada pelo estado da arte (MURAI et al, 2010) que utiliza apenas a velocidade para detecção da fase. Isso mostra que a combinação da



velocidade com  $M_1$  proposta na técnica VS, desenvolvida nesta Tese, não é apenas uma alternativa às outras técnicas, mas que realmente tem o potencial de desempenhar melhor que o estado da arte atual.

Quando o escoamento de ascensão de bolhas está enclausurado por um tubo de acrílico, o pico do espectro da velocidade desempenha melhor que os outros parâmetros. Neste caso, a presente técnica apresenta uma pequena degradação no erro RMS ( $E=3,3$ ), entretanto a probabilidade somada de PFD com PFP aumenta em cerca de 3 vezes ( $PFD+PFP=11,9\%$ ).

A metodologia proposta também foi estendida para o caso de não usar partículas rastreadoras de movimento, e, neste caso não foi necessário filtrar os parâmetros de formato pelo mapa da velocidade. O melhor desempenho de detecção ocorreu utilizando o pico do espectro que obteve um erro RMS de 1,71 e  $PFD+PFP=0,89\%$ .

Num último caso, uma placa metálica foi adicionada para obstruir o transdutor. Verificou-se que a melhor maneira de aplicar a técnica VS é usar o quadrado do pico do espectro ponderado pelo momento de ordem zero,  $M_0$ , do espectro, atingindo um erro RMS de 3,39 e  $PFD+PFP=5,3\%$ .

Embora a técnica VS tenha sido testada somente em um escoamento de superfície livre, a mesma pode ser estendida para o caso de escoamento interno. Como qualquer técnica ultrassônica, está restrita a ser utilizada em baixas frações de vazios, tipicamente menores que 20%, devido ao efeito de oclusão. Escoamento em golfadas, que pode apresentar frações de vazio típicas de 40%, é uma exceção a essa restrição devido ao seu comportamento intermitente. Para melhores resultados, a concentração das partículas rastreadoras de movimento deve ser mantida o mais baixa possível, porque a superposição dos ecos de um grande número de partículas pode ser interpretada erroneamente como uma bolha.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

A partir do que foi feito nesta tese sugere-se para o futuro trabalhar nos seguintes temas:

- Testar o desempenho da técnica proposta quando aplicadas a tubulações de materiais metálicos/acrílicos, para escoamentos de bolhas dispersas, utilizando a malha de eletrodos para verificar a posição medida da interface.

- Na análise dos espectros de velocidade de um grande conjunto de dados da experiência de ascensão de bolhas, notou-se que em alguns casos ocorre a presença de mais de um pico no espectro. Em geral, os picos secundários têm menor amplitude e parecem estar relacionados com a velocidade do líquido ou com ruído. Pode-se tentar suprimir esses picos numa tentativa de melhorar o desempenho na detecção da interface. Outra abordagem seria a de extrair novos parâmetros formato a partir desses outros picos como: número de picos, valor da amplitude, energia, etc.

- Utilizar ainda mais informações que podem ser obtidas pelo estimador VMS, como a velocidade média do volume amostral, pesquisar por um segundo pico de velocidade no espectro e que relações com o escoamento o valor da amplitude dessas velocidades podem ter.

- Verificar se existe correlação entre a energia do espectro de velocidades com o padrão de escoamentos, dentre outras informações estatísticas que podem ser obtidas dele.

- Estudar a viabilidade da técnica ultrassônica Doppler pulsado em se obter a fração de óleo em água.

- Pesquisar a relação da amplitude do espectro da velocidade com a concentração de partículas em escoamentos bifásicos líquido-sólido.

- Verificar se existe correlação da amplitude do VMS com a velocidade das fases principalmente em escoamentos intermitentes, pois a mesma pode servir como um filtro para suavizar valores de velocidade de mapeamento que apresente muita dispersão de valores.

- Estudar a aplicação da técnica proposta em escoamentos trifásicos sólido-gás-líquido.

- Aplicar a técnica de detecção da interface proposta para estudo da eficiência de bombas centrífugas submersíveis através da estimação do tamanho das bolhas. Consiste em utilizar um transdutor de diâmetro ativo comparável ao tamanho das bolhas para estimar a velocidade das mesmas aliado a um segundo transdutor de menor diâmetro que irá estimar o tempo de residência da interface da bolha por meio da técnica proposta nesta tese. Com a velocidade e o tempo de residência das bolhas é possível obter uma estimativa do diâmetro equivalente de esfera das mesmas.

## REFERÊNCIAS

ADRIAN, R. J. Laser Velocimetry, in: **GOLDSTEIN, R. J., Fluid Mechanics Measurements**, 2<sup>nd</sup> Ed., Taylor & Francis, Washington ,D.C., pp.115-173, 1996.

ADRIAN, R. J. Twenty years of particle image velocimetry. **Experiments in Fluids**, 39, pp. 159-169, 2005.

ALAM, S. K.; PARKER, K. J. Implementation issues in ultrasonic flow imaging. **Ultrasound in med. & Biol.**, 29:4, pp. 517-528, 2003.

ARITOMI, Masanori; KIKURA, Hiroshige; SUZUKI, Yumiko. Ultrasonic Doppler Method for Bubbly flow Measurement. In: **Proceedings of 4th Workshop on Measurement Technique for Stationary and Transient Two-Phase flows**, 2000.

AZZOPARDI, Barry J. **Gas-liquid Flows**. New York: Begell House, 2006.

AZZOPARDI, Barry J.; HERNANDEZ PEREZ V.; KAJI R.; DA SILVA Marco José; BEYER M.; HAMPEL,U. Wire mesh sensor studies in a vertical pipe. In: **HEAT 2008, Fifth International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems**, jun. 30 – jul. 3, Bialystok, Poland, 2008.

BOYER, C.; DUQUENNE, A.M.; WILD, G. Measuring techniques in gas-liquid and gas-liquid-solid reactors. **Chemical Engineering Science**, 57, 3185-3215, 2002.

BRÖRING, S.; FISCHER, J.; KORTE, T.; SOLLINGER, S.; LÜBBERT, A. Flow structure of the dispersed gas phase in real multiphase chemical reactors investigated by a new ultrasound-Doppler technique. **Canadian Journal of Chemical Engineering** , 69, 1247–1256, 1991

CANNY, J. A Computational Approach to Edge Detection. **IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Vol. PAMI-8, 6, 679–698, 1986.

CARTELLIER, Alain. Simultaneous void fraction measurement, bubble velocity, and size estimate using a single optical probe in gas-liquid two-phase flows. **Review of Scientific Instruments**, 63(11), 5442–5453, 1992.

CARTELLIER, Alain; BARRAU, E. Monofiber optical probes for gas detection and gas velocity measurements: Conical probes. **International Journal of Multiphase Flow**, 24(8), 1265–1294, 1998.

CHANSON, H. Air-Water Flow Measurements with Intrusive, Phase-Detection Probes: Can We Improve Their Interpretation? **Journal of Hydraulic Engineering**, 128:252-255, 2002.

CHRISTENSEN, Douglas A. **Ultrasonic bioinstrumentation**. New York, Wiley, 1988.

COUTINHO, F. R.; OFUCHI, C. Y.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES, F. JR; MORALES, R.E.M. A New Method for Ultrasound Detection of Interfacial Position in Gas-Liquid Two-Phase Flow. **Sensors**, v. 14, n. 5, p. 9093-9116, 2014a.

COUTINHO, F. R.; OFUCHI, C. Y.;ARRUDA, L. V. R.;NEVES, F. JR; MORALES, R.E.M. Accuracy evaluation of a crossed beam double element transducer for ultrasound velocity profiler application. In: **Proceedings of the 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering**, agosto 27-29 , Strasbourg, France. **Aceito**, 2014b.

CZARKE, J.W. Laser Doppler Velocimetry Using Powerful Solid-State Light Sources, **Measuring Science Technology**, 17, 2006.

Da SILVA, Marco José. **Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging**. 2008. 154p. PhD thesis, Electrical and Computer Engineering Department – Technische Universität Dresden, Dresden, 2008.

EREAUT, P. R. Tracer Methods. **Thermopedia**. DOI: 10.1615/AtoZ.t.tracer\_methods, 2011.

EVANS, D. H.; McDICKEN, W. N.; SKIDMORE, R.; WOODCOCK, J. P. **Doppler Ultrasound: Physics, Instrumentation, and Clinical Applications**. New York, Wiley, 1989.

FINGERSON, L.M.; FREYMUTH ,P. Thermal anemometers, In: GOLDSTEIN, R. **Fluid Mechanics Measurements**, 2<sup>nd</sup> Ed., Taylor & Francis, Washington , D.C., pp.115-173, 1996.

FOSSA, M. Design and performance of a conductance probe for measuring liquid fraction in two-phase gas-liquid flow. **Flow Measurement and Instrumentation**, 9, 103-109, 1998.

FOX, Robert W.; McDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução á mecânica dos fluidos**, 6 Ed., LTC, Rio de Janeiro, 2006.

HAMMER, E. A.; JOHANSEN, G.A.; DYAKOWSKI, T; ROBERTS, E.P.L.; CULLIVANS J.C.; WILLIAMS, R.A.; HASSAN, Y.A.; CLAIBORN, C.S; Advanced experimental techniques. In: Crowe, C.T. **Multiphase Flow Handbook**, Boca Raton: CRC Press, 2006.

HERNANDEZ PEREZ, V.; AZZOPARDI, Barry J.; KAJI, R.; DA SILVA, Marco José; BEYER, M.; HAMPEL, U. Wisp-like structures in vertical gas-liquid pipe flow revealed by Wire Mesh Sensor studies. **International Journal of Multiphase Flow**, 36, 908-915, 2010.

HINZE, J. O. **Turbulence**, McGraw Hill, New York, 1975.  
HOEKS, A. P. G.; van der VORST, J. J. W.; DABEKAUSSEN, A.; BRANDS, P. J.; RENEMAN, R. S. An efficient algorithm to remove low frequency Doppler signals in digital Doppler systems. **Ultrasound Imaging**. 13:135-145, 1991.

JENSEN, Jørgen Arendt. **Estimation of Blood Velocities Using Ultrasound: A signal processing approach**. 2ª Edição. Lyngby, Technical University of Denmark – Department of Electrical Engineering, 243p. 2008.

JOHNSON, R. W. **The Handbook of Fluid Dynamics**, Springer-Verlag, Boca Raton, FL, 2000.

JULIÁ, J. Enrique; Hartevelde, Wouter K.; Mudde, Robert F.; Van den Akker, Harrie E. A. On the accuracy of the void fraction measurements using optical probes in bubbly flows. **Review of Scientific Instruments**, 76, 035103, 1-13, 2005.

KIRKHORN, Johan. **Introduction to IQ-demodulation of RF-data**. Notas de aula, Norwegian University of Science and Technology, IFBT, setembro, 1999. Disponível em <<http://folk.ntnu.no/htorp/Undervisning/TTK10/IQdemodulation.pdf>>. Acesso em 22 junho de 2012 14:41.

KITaura, Hidekazu; Tadata, Norihiko; Tasaka, Yuji; Takeda, Yasuhi. A new algorithm for low velocity measurement by UVP. In: **4<sup>th</sup> International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluids Mechanics and Fluid Engineering**, 2004.

LIU, L.; ZHENG, H.; WILLIAMS, L.; HERTZBERG, J. A custom-designed Ultrasound Echo Particle Image Velocimetry System: Initial Experiments. In: **5<sup>th</sup> International**

**Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluids Mechanics and Fluid Engineering**, 2006.

MANDHANE, J. M.; GREGORY, G. A.; AZIZ, K.; A Flow Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, vol. 1, p. 537-553, 1974.

MAVROS, P. Flow Visualization in Stirred Vessels: A Review of Experimental Techniques. **Transactions on Institution of Chemical Engineers**, Vol. 79, Part A , March, 2001.

MORI, M.; TAKEDA, Y.; TAISHI, T.; FURUICHI, N.; ARITOMI, M.; KIKURA, H. Development of a novel flow metering system using ultrasonic velocity profile measurement. **Experiments in Fluids**. 32:153-160, 2002.

MURAI, Yuichi; FUJI, H.; TASAKA, Yuji; TAKEDA, Yasushi. UVP Measurement of a Turbulent Channel Flow Containing Large Bubbles. In: **Proceedings of Fifth International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluids Mechanics and Fluid Engineering**, 2006.

MURAI, Yuichi; OHTA, Shoko; SHIGETOMI, Akinari; TASAKA, Yuji; TAKEDA, Yasushi. Development of an ultrasonic void fraction profiler. **Measurement Science and Technology**, 20, 2009.

MURAI, Yuichi; TASAKA, Yuji; NAMBU, Yuichi.; TAKEDA, Yasushi; GONZALEZ, S. Roberto. Ultrasonic detection of moving interface in gas-liquid two-phase flow. **Flow Measurement and Instrumentation**, 21, 356-366, 2010.

MURAI, Yuichi; TASAKA, Yuji; TAKEDA, Yasushi. Time-Resolved Flowmetering of Gas-Liquid Two-Phase Pipe flow by Ultrasound Pulse Doppler Method. In: **Proceedings of the 7TH International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows**, Volume 1428, pp. 311-318 2012

MURAKAWA, Hideki; KIKURA, Hiroshige; ARITOMI, Masanori. Application of Ultrasonic Doppler Method for Bubbly Flow Measurement Using Two Ultrasonic Frequencies. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 29, 843-850, 2005.

MURAKAWA, Hideki; KIKURA, Hiroshige; ARITOMI, Masanori. Application of Ultrasonic Multi-Wave Method for Two-Phase Bubbly and Slug Flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, 19, 205-213, 2008.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W.; BUCK, John R. **Discrete-Time Signal Processing**. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999, 870p.

OTSU, Nobuyuki. A threshold selection method for gray-levels histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, vol. SMC-9, No. 1, jan, 1979.

PRASSER H. M.; BÖTTGER A.; ZSCHAU J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, 9, 111-119, 1998.

PRASSER, H. M.; SCHOLZ, D.; ZIPPE, C. Bubble size measurement using wire-mesh sensors. **Flow Measurement and Instrumentation**, 12, 299-312, 2001.

PHILIPS, Wiliam T. Mayo; Paul M. Embree. **Two Dimensional Processing of Doppler Signals**, US n.4930513, 26 jul. 1988, 5 jun. 1990.

QIN, F. Blind Image restoration based on signal-to-noise ratio and Gaussian point spread function estimation. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, 2013.

RAFFEL, M.; WILLERT, C.; KOMPENHANS, J. **Particle image velocimetry, a practical guide**. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1998.

RUSHMER, R.F.; BAKER, D.W.; JOHNSON, W.L. et al: Clinical applications of a transcutaneous ultrasonic flow detector. **The Journal of the American Medical Association**, 199:326-328, 1967.

SCHLAIKJER, Malene. **Development and characterization of algorithms for estimation of blood velocity with ultrasound**. 2001. 192p. Ph.D. dissertation, Section of Electronics and Signal Processing, Department of Information Technology, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2001.

SELFRRIDGE, Alan R. Approximate Material Properties in Isotropic Materials. In: **IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics**, Vol SU-32, 3, 1985.

SHOHAM, Ovadia. **Mechanistic modeling of gas-Liquid Two-phas Flow in Pipes**. Society of Petroleum, 2006.

SHUNG, K. K. **Diagnostic Ultrasound: Imaging and Blood Flow Measurements**. CRC Press, 232p., 2005.

STAINBACK, P.C.; NAGABUSHANA, K. A. Review of Hot-Wire Anemometry Techniques and the Range of their Applicability for Various Flows, **Electronic Journal of Fluids Engineering**, Transactions of the ASME, 2002.

STEIN, M.; MARTIN, T.W.; SEVILLE, J.P.K.; MCNEIL, P.A.; PARKER, D.J. Positron Emission Particle Tracking: Particle Velocities in Gas Fluidized Beds, Mixers and Other Applications. In: CHAOUKI, J.; LARACHI, F.; DUDUKOVIC, M. P. **Non-Invasive Monitoring of Multiphase Flows**, Elsevier, 1997.

STOTT, A. L.; GREEN, R. G.; SERAJI, K. Comparison of the use of internal and external electrodes for the measurement of the capacitance and conductance of fluids in pipes. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, 18, 587–592, 1985.

SUZUKI, Yumiko; NAKAGAWA, Masamichi; ARITOMI, Masanori; MURAKAWA, Hideki; KIKURA, Hiroshige; MORI, Michitsugu. Microstructure of the flow field around a bubble in counter-current bubbly flow, **Experimental Thermal and Fluid Science**, 26, 221–227, 2002.

TAKEDA, Yasushi. Velocity Profile Measurement by Ultrasound Doppler Shift Method, **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 7(4) 313-318, 1986.

TAKEDA, Yasushi. Development of Ultrasound Velocity Profile Monitor, **Nuclear Engineering and Design**, 126, 277-284, 1990.

TAKEDA, Yasushi. Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Method, **Experimental Thermal and Fluid Science**, 10:444-453, 1995.

TAKEDA, Yasushi. Development of a new flow metering system using UVP - (1) Principle, Configuration and Laboratory Experiments. In: **Proceedings of 2nd International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering**, set. 1999.

TAKEDA, Yasushi. **Ultrasonic Doppler fluid flow**. Springer, Japan, 2012



TORP, Hans G. Velocity Matched Spectrum Analysis: A new method for suppressing velocity ambiguity in pulsed-wave Doppler. **Ultrasound in Medicine & Biology**. Vol. 21, No. 27, pp. 937-944, 1995.

TORP, Hans G. Estimation of blood velocities from Doppler signals. In: **ANGELSEN, Bjørn A. J. Ultrasound Imaging: Waves, Signals, and Signal Processing**. Vol. 2, Cap. 10, 46p. Emantec, Norway, 2000.

WADA, Sanehiro; KIKURA, Hiroshige; ARITOMI, Masanori; TAKEDA, Yasushi. Multiline Flow Rate Measurement Using Ultrasonic Doppler Method, In: **Proceedings of Third International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering**, 2002.

WANG, Tiefeng; WANG, Jinfu; REN, Fei; JIN, Yong. Application of Doppler Ultrasound Velocimetry in Multiphase Flow, **Chemical Engineering Journal**, 92, 111-122, 2003.

WANGJIRANIRAN, W.; MOTEGI, Y.; RICHTER, S.; KIKURA, H.; ARITOMI, M.; YAMAMOTO, K. Intrusive effect of wire mesh tomography on gas-liquid flow measurement. **Journal of Nuclear Science and Technology**, 40, 932-940, 2003.

WILSON, L. S. Description of Broad-band pulsed Doppler ultrasound processing using the two-dimensional Fourier transform. **Ultrasonic Imaging**, 13, 301-315, 1991.

ZARUBA, A.; KREPPER E.; PRASSER H.-M.; SCHLEICHER E. Measurement of bubble velocity profiles and turbulent diffusion coefficients of the gaseous phase in rectangular bubble column using image processing. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 29, pp. 851-860, 2005.

## APENDICE A – Teoria Clássica do Doppler Pulsado

Seja um transdutor de ultrassom emitindo uma onda com frequência  $f_i$ , denominado de fonte, incidindo com ângulo  $\phi_i$  sobre a interface de um elemento em movimento com velocidade  $v$ , conforme mostra a Figura 54. O feixe incidente possui um comprimento de onda  $\lambda_i$  quando se propaga no meio, de velocidade  $c$ , que envolve a onda e o elemento.

O elemento, que está se afastando das ondas acústicas, perceberá que as cristas das ondas o atingem com uma frequência menor,  $f_m$ , e, portanto para ele a velocidade da onda que o atinge é:

$$c_m = c - v \cos \phi_i. \quad (96)$$

Assim a frequência que o elemento percebe,  $f_m = c_m / \lambda_i$ , será:

$$f_m = \frac{c - v \cos \phi_i}{\lambda_i} \quad (97)$$

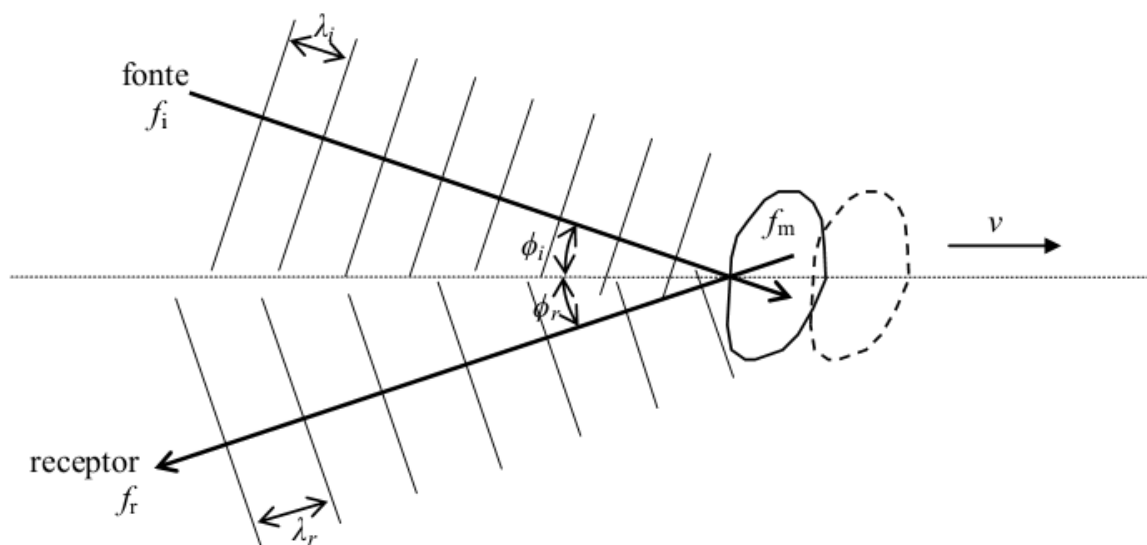


Figura 54 – Diagrama de interação da onda de ultrassom com uma partícula refletora. A mesma se move com velocidade horizontal  $v$ , espalhando as ondas incidentes de uma fonte de frequência  $f_i$  e comprimento de onda  $\lambda_i$ . As linhas paralelas representam as frentes de onda. O refletor reirradia a pressão acústica com frentes de ondas mais espaçadas devido ao seu movimento de afastamento em relação ao receptor, que possuem comprimento de onda,  $\lambda_r > \lambda_i$  alterando, portanto a frequência recebida,  $f_r$ .

Fonte: Adaptado de Christensen (1988).

Mas  $\lambda_i = c/f_i$ , e, portanto pode-se escrever a frequência,  $f_m$ , da equação (97) em função da frequência incidente da fonte como

$$f_m = f_i \frac{c - v \cos \phi_i}{c},$$

$$f_m = f_i - f_i \frac{v \cos \phi_i}{c},$$

$$f_m = \frac{c - v \cos \phi_i}{\lambda_i}. \quad (98)$$

Assim a diferença entre a frequência percebida  $f_m$ , e a incidente  $f_i$  está relacionada com a componente de velocidade que o elemento possui na direção da onda incidente.

A onda incidente provocará uma oscilação no elemento que por consequência irá provocar a reirradiação da onda e uma delas, a de ângulo  $\phi_r$ , será a recebida pelo receptor. Para o elemento que está se afastando em relação ao receptor, ele percebe a onda se afastando mais rápido do que a velocidade que ela se propaga no meio, e, portanto será:

$$c_o = c + v \cos \phi_r. \quad (99)$$

Esse movimento de afastamento expande o comprimento de onda da onda reirradiada no meio de propagação, que será dado agora pela divisão da velocidade,  $c_o$ , da frequência,  $f_m$ , resultando em

$$\lambda_r = \frac{c_o}{f_r} = \frac{c + v \cos \phi_r}{f_m}. \quad (100)$$

Então a frequência recebida pelo receptor,  $f_r = c_m/\lambda_r$  substituindo pela equação (100) será de:

$$f_r = \frac{c f_m}{c + v \cos \phi_r}. \quad (101)$$

Para deixar a equação (101) em função da frequência incidente,  $f_i$ , basta substituir o valor de  $f_m$  dado pela equação (98), assim

$$f_r = \frac{cf_i \left(1 - \frac{vcos\phi_i}{c}\right)}{c + vc\cos\phi_r}. \quad (102)$$

O desvio na frequência devido ao efeito Doppler é definido como a diferença entre a frequência recebida e a transmitida, de acordo com:

$$f_d = f_r - f_i. \quad (103)$$

Então substituído a equação (102) na (103), obtemos:

$$f_d = \frac{cf_i \left(1 - \frac{vcos\phi_i}{c}\right)}{c + vc\cos\phi_r} - f_i. \quad (104)$$

Reordenando os termos, aplicando algumas transformações matemáticas na equação (40), descritas abaixo, chega-se em:

$$f_d(c + vc\cos\phi_r) = cf_i \left(1 - \frac{vcos\phi_i}{c}\right) - f_i(c + vc\cos\phi_r),$$

$$f_d(c + vc\cos\phi_r) = cf_i - cf_i \frac{vcos\phi_i}{c} - cf_i - f_i vc\cos\phi_r,$$

$$f_d(c + vc\cos\phi_r) = -cf_i \frac{vcos\phi_i}{c} - cf_i \frac{vcos\phi_r}{c},$$

$$\frac{f_d(c + vc\cos\phi_r)}{c} = -f_i \frac{vcos\phi_i}{c} - f_i \frac{vcos\phi_r}{c}. \quad (105)$$

Nessa parte da dedução pode ser realizada uma simplificação que é válida para a maioria das situações encontradas na prática:

$$v \ll c \quad (106)$$

Com isso é possível eliminar o termo  $vcos\phi_r$  do lado esquerdo da equação (105) obtendo-se como resultado final:

$$f_d = -\frac{v}{c}(cos\phi_i + cos\phi_r)f_i \quad (107)$$

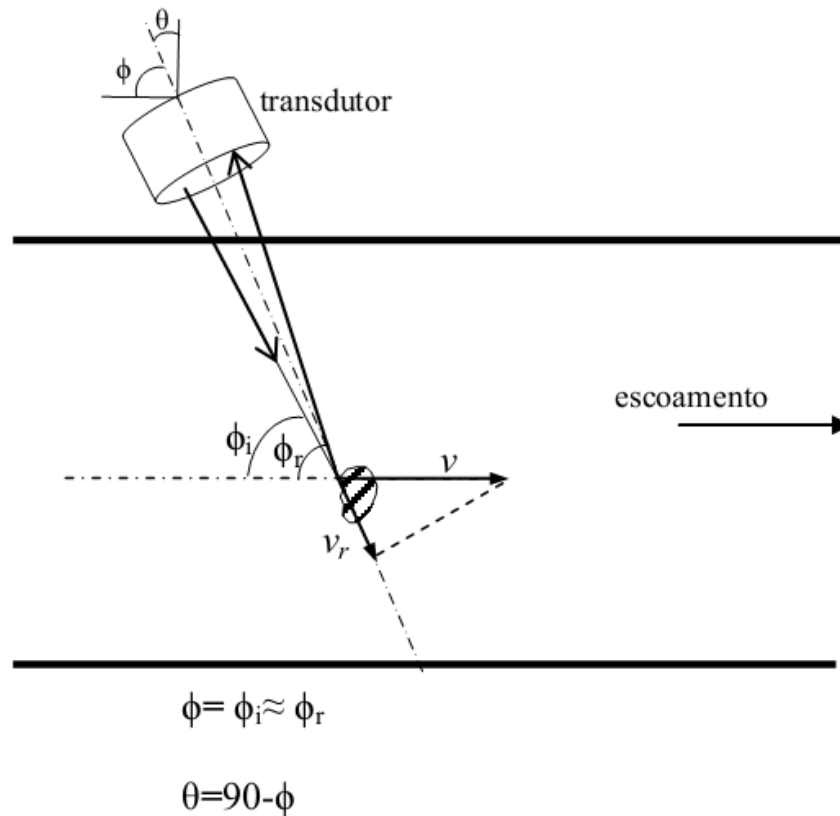
O desvio Doppler é diretamente proporcional à frequência de incidência, mas a porcentagem de  $f_i$  só depende da velocidade do elemento e a velocidade de propagação do som no meio. O sinal negativo indica que o elemento que se move, está se afastando do feixe de incidência. Se o movimento fosse de aproximação, o sinal da equação (107) seria positivo.

Quando se utiliza o mesmo transdutor para transmitir e receber a onda acústica, que é a realização mais comum desta técnica, a diferença entre os ângulos de incidência e reflexão é muito pequena, como ilustra a Figura 55. Assim, é comum utilizar o ângulo de inclinação do transdutor em relação à parede da tubulação,  $\phi$ , que é a bissetriz dos ângulos de incidência e recepção. Nas montagens experimentais é comum se referir ao ângulo entre a normal da tubulação e o eixo do transdutor, que na Figura 55 está representado pela variável  $\theta=90-\phi$ .

Fazendo a aproximação dos ângulos,  $\phi = \phi_i \approx \phi_r$  na equação (107) e aplicando o módulo em  $f_d$  ela passa a ficar:

$$|f_d| = \frac{2vcos\phi f_i}{c}. \quad (108)$$

A equação (108) é a forma mais comum que se utiliza para avaliar o efeito Doppler. Ressaltando que a velocidade do elemento só depende do ângulo de incidência do transdutor e da velocidade de propagação da onda acústica no meio onde o elemento se encontra. A única propriedade necessária ao elemento para que o efeito seja mensurável, é possuir alta refletividade, ou seja, ele deve apresentar uma grande diferença de impedância acústica em relação à impedância do meio.



**Figura 55** – Diagrama da realização típica da técnica Doppler em escoamentos. Um transdutor é posicionado com ângulo de  $\theta$  graus em relação à normal da tubulação. Ele mede de forma direta a velocidade radial,  $v_r$ , das partículas que atravessam seu feixe, para medir a velocidade horizontal do escoamento basta dividir a  $v_r / (\cos(90 - \theta))$ .

Fonte: Autoria própria.

Quando se utiliza a equação (108) para cálculo da velocidade, duas nomenclaturas diferentes são utilizadas e, portanto é relevante mencionar. A velocidade radial,  $v_r$ , é a velocidade ao longo do eixo do feixe do transdutor de ultrassom, como mostrado na Figura 55, e é dada por:

$$v_r = v \cos \theta. \quad (109)$$

Substituindo a equação (109) na (108), chega-se na seguinte relação para a velocidade radial:

$$v_r = \frac{c f_d}{2 f_i}. \quad (110)$$

A velocidade  $v$  mencionada na equação (109) é também referida frequentemente como velocidade horizontal, ou vertical de acordo com o escoamento, pois é na realidade a componente da velocidade radial na direção do escoamento, e, portanto é dada por:

$$v = \frac{cf_d}{f_i \cos\phi}. \quad (111)$$

## APENDICE B – LISTA DE PUBLICAÇÕES

### B.1 PUBLICAÇÕES CONTIDAS NESTA TESE

COUTINHO, F. R.; OFUCHI, C. Y.; NEVES, F. JR; MORALES, R.E.M. Técnica Ultrassônica de Doppler Pulsado para Determinar a Velocidade das Fases em um Escoamento Bifásico Gás-Líquido de Bolhas Dispersas. In: **3º Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos**, Maio 07-08, Curitiba, Brasil, 2012.

COUTINHO, F. R.; OFUCHI, C. Y.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES, F. JR; MORALES, R.E.M. A New Method for Ultrasound Detection of Interfacial Position in Gas-Liquid Two-Phase Flow. **Sensors** v. 14, n. 5, p. 9093-9116, 2014.

COUTINHO, F. R.; OFUCHI, C. Y.;ARRUDA, L. V. R.;NEVES, F. JR; MORALES, R.E.M. Accuracy evaluation of a crossed beam double element transducer for ultrasound velocity profiler application. In: **Proceedings of the 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering**, agosto 27-29 , Strasbourg, France. **Aceito**, 2014.

### B.2 PUBLICAÇÕES NÃO RELACIONADAS DIRETAMENTE

COUTINHO, F. R.; OFUCHI, C. Y.; RASIA, R. S.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES, F. JR; MORALES, R.E.M. A Flexible Ultrasonic Velocity Profiler Developing Environment. In: **Proceedings of the 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (IM2CT)**, maio 12-15, Montevideo, Uruguay, 2014.

COUTINHO, F. R.; OFUCHI, C. Y.; NEVES, F. JR; ARRUDA, L. V. R.; MORALES, R.E.M. Extended Autocorrelation Velocity Estimator Applied to Fluid Engineering. In: **Proceedings of the 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering**, agosto 27-29, Strasbourg, France. **Aceito**, 2014.



## APENDICE C – ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO DE VELOCIDADE

```

function [ v, S ] = RadialProjection(data,fs,fc,prf,c,fator,v_min)
% data : matriz de dados demodulados em quadratura(em número complexo)
% fs : frequência com que é amostrado o sinal do transdutor
% fc : frequência fundamental do transdutor
% prf: pulse repetition frequency, quantos disparos são feitos por segundo
% c : velocidade do som no meio
% fator : quantas vezes o limite de Nyquist será extrapolado
% v_min : menor velocidade que se deseja medir
% v: abcissa com os valores de velocidade do espectro
% S: valores da ordenada do espectro de velocidades
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Combina as duas janelas 1D para criar uma janela de hamming 2D
w2D=repmat(hamming(Nl),[1 Nc]).*(repmat(hamming(Nc),[1 Nl]));
data=data.*w2D;% aplica a janela nos dados

%Estima a densidade espectral de potência
A=fftshift(fft2(data,Nl,Nc)/(Nl*Nc));
[Nl, Nc]=size(A);
A=A.*conj(A);

%calcula o passo no eixo y
dy=fs/Nl;

%calcula o passo no eixo x
dx=prf/Nc;

% calcula o metade da matriz de dados de acordo
% com a paridade do tamanho da matriz
if mod(Nl,2)==0
    kl=Nl/2+1; % Nc é par
else
    kl=Nl/2+0.5; % Nc é ímpar
end

if mod(Nc,2)==0
    kc=Nc/2+1; % Nc é par
else
    kc=Nc/2+0.5; % Nc é ímpar
end

% executa o algoritmo de projeção radial

v_max=fator*(prf*c)/(4*fc);
% calcula valores dos ângulos a serem percorridos de acordo

```

```

% com a faixa de velocidades e velocidade mínima desejados
alpha=(2*(-v_max:v_min:+v_max))/c;
m=1:Nl;
% inicia o vetor com os valores do espectro com zeros
S=zeros(1:size(alpha));
for i=1:size(alpha,2)
    nr=alpha(i)*((m-kl)*dy+0)/dx+kc;
    n=floor(nr);
    delta=nr-n;
    n=mod(n-1,Nc)+1;
    npl=n+1;
    npl=mod(npl-1,Nc)+1;
    idx = sub2ind(size(A), m, n);
    tmp = (1-delta).*A(idx)+delta.*A(idx2);
    S(i)=sum(tmp);
end
% converte o ângulo para velocidade
v=-alpha*(c/2);
end

```